



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РУДОПОДГОТОВКИ И ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Сборник статей
по материалам докладов VIII Российского
семинара по технологической минералогии



**МЕХАНОБР
ТЕХНИКА**

RUSSIAN MINERALOGICAL SOCIETY
COMMISSION ON TECHNOLOGICAL MINERALOGY

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
KARELIAN RESEARCH CENTRE
INSTITUTE OF GEOLOGY



**TECHNOLOGICAL MINERALOGY
IN OPTIMIZING PROCESSES
OF ORE PREPARATION
AND MINERAL PROCESSING**

**Collection of articles following the VIII Russian Seminar
of the Technological Mineralogy**

St. Petersburg, April, 23–24, 2013

Edited by Dr. sc. Vladimir V. Shchiptsov

Petrozavodsk
2014

РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
КОМИССИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РУДОПОДГОТОВКИ И ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

**Сборник статей по материалам докладов VIII Российского семинара
по технологической минералогии**

Санкт-Петербург, 23–24 апреля 2013 г.

Под редакцией д. г.-м. н. В. В. Щипцова

Петрозаводск
2014

УДК 622.7(063)
ББК 33.4
Т38

Рецензент:
д. т. н. Калинин Ю. К.

**Т38 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ
РУДОПОДГОТОВКИ И ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ.** Сборник
статей по материалам докладов VIII семинара по технологической минералогии. Петро-
заводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 197 с.

ISBN 978–5–9274–0613–5

*Тексты статей воспроизведены в авторской редакции
с незначительной технической правкой*

ISBN 978–5–9274–0613–5

© Российское минералогическое общество, 2014
© Карельский научный центр РАН, 2014
© Институт геологии КарНЦ РАН, 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Комиссия по технологической минералогии РМО провела 23–24 апреля 2013 г. в г. Санкт-Петербурге на базе НПК «Механобр-Техника» VIII Российский семинар «Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья». Подобные семинары по технологической минералогии проходят ежегодно с 2006 года.

В 2013 году участников радушно встречали в НПК «Механобр-Техника». Непосредственно в работе семинара участвовали представители ряда научных и коммерческих организаций страны, представляющих различные регионы России: Апатиты (ИХТРЭМС КНЦ РАН, ГИ КНЦ РАН), Магадан (СВКНИИ ДВО РАН), Магнитогорск (МГТУ), Москва (ФГУП «ВИМС», ФГУП «ИМГРЭ», ИПКОН РАН, ОИВТ РАН, Техноинфо Лтд), Новосибирск (ИГиМ СО РАН), Петрозаводск (ИГ КарНЦ РАН, ПетрГУ), Петропавловск-Камчатский (Институт вулканологии), Санкт-Петербург (НПК «Механобр-Техника», ЗАО «Механобр-Инжиниринг», Корпорация BRUKER, ООО «Институт Гипроникель», ООО «Гравелит», НИУ ИТМО), Саратов (Саратовский ГУ, ООО «ЭкоСорбент»), Сыктывкар (ИГ КомиНЦ УрО РАН, ИСЭиЭПС Коми НЦ УрО РАН), Уфа (БГУ, ООО «Клариса»). Зарегистрировано более 50 участников.

Рассматривались следующие актуальные проблемы технологической минералогии:

1. Основные направления развития современной технологической минералогии.
2. Минералогический прогноз обогатимости.
3. Новые технологии дезинтеграции минерального сырья.
4. Моделирование процессов дробления и реализация физических методов анализа рудного сырья.

На открытии семинара с приветственными словами выступили председатель совета директоров НПК «Механобр-техника» чл. -корр. РАН Л. А. Вайсберг и председатель Комиссии по технологической минералогии РМО, директор ИГ КарНЦ РАН д. г. -м. н. В. В. Щипцов. Всего в рамках семинара было заслушано 6 пленарных и 20 секционных докладов, обсуждено 9 стендовых презентаций.

С пленарными докладами выступили:

Пирогов Б. И. (ФГУП «ВИМС», Москва) Сравнения минералов и структурный анализ руд в технологической минералогии.

Вайсберг Л. А., Иванов К. С. (НПК «Механобр-Техника», Санкт-Петербург) Вещественный состав и особенности вибрационной классификации минерального сырья.

Ожогина Е. Г. (ФГУП «ВИМС», Москва) Проблемы и перспективы развития количественных минералогических методов оценки качества полезных ископаемых.

Юсупов Т. С. (ИГиМ СО РАН, Новосибирск) Технологическая минералогия геоматериалов, измельченных при повышенной электронапряженности.

Мелентьев Г. Б. (ОИВТ РАН, Москва) Проблема вовлечения в промышленное использование техногенных ресурсов России: приоритетные направления оценки, инновационных техноэкологических решений и создания инвестиционно-привлекательного законодательства.

Котова О. Б. (ИГ КомиНЦ УрО РАН, Сыктывкар) Научное обоснование и разработка методов энергетических воздействий на труднообогащаемое минеральное сырье.

В устных и стендовых докладах были представлены новые и разнообразные материалы, в частности, по технологии дезинтеграции редкометаллических руд и россыпей и их влиянию на технико-экономические показатели освоения месторождений (Левченко Е. Н., Калиш Е. А., ФГУП «ИМГРЭ», Москва), минералого-технологической характеристике платиносодержащих дунитовых руд Среднего Урала (Козлов А. П., ИПКОН РАН, Москва), технологической оценке текущих хвостов обогащения колчеданных руд Южного Урала (Горбатова Е. А., Магнитогорский ГТУ), минералогическому прогнозу обогатимости Au-Ag руд Кольского п-ова (Войтеховский Ю. Л. и др., ГИ КНЦ РАН, Апатиты), обогащению глауконитовых песков месторождений Саратовской области (Синельцев А. А., Щербакова Н. Н., ООО «ЭКОсорбент», Саратов), минералого-геохимической характеристике палеопротерозойских кварцевых конгломератов как нетрадиционному источнику кварцевого сырья (Светова Е. Н., Скамницкая Л. С., Светов С. А., ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск), слоистым природным материалам как носителям активных компонентов при получении синтетических и минеральных материалов (Николаев А. И в соавторстве с Герасимовой Л. Г., ИХТРЭМС КНЦ РАН, Апатиты), роли технологической минералогии на современном этапе в создании

новых материалов на основе магнезиальных горных пород и промышленных минералов Карелии (Фролов П. В., Ильина В. П., Попова Т. В., Климовская Е. Е., ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск), по анализу изменения состава и свойств тонкодисперсных шунгитовых порошков в зависимости от рудоподготовки (Ануфриева С. И., ФГУП «ВИМС», Москва) и др.

Содержательные доклады сделали молодые ученые – Азарнова Л. А. (ФГУП «ВИМС», Москва), Вахрушев А. В. (ИГ КомиНЦ УрО РАН), Гонтаренко В. А. (ЗАО «НПП ГеоТестСервис», Москва), Алехин А. А. (НИУ ИТМО, Санкт-Петербург).

Интерес вызвали доклады по процессам дезинтеграции и применяемым аппаратам, в частности, доклад Устинова И. Д. в соавторстве с Вайсбергом Л. А. о современном оборудовании НПК «Механобр-техника» для изучения технологических свойств минерального сырья. В сообщении Чихладзе В. В. (ИПКОН РАН, Москва) были затронуты проблемы технологического моделирования дезинтеграции в роллер-прессе. В докладе Аккерман Ю. Э. (ЗАО «Механобр инжиниринг», Санкт-Петербург) дана оценка возможности практического использования валков высокого давления в схемах дезинтеграции руды повышенной прочности.

На семинаре состоялась презентация Корпорации BRUKER. В программу семинара был также включен «круглый стол» под председательством чл.-корр. РАН Л. А. Вайсберга. Ход дискуссии подтверждал, что качественный скачок в практике переработки руд следует ожидать с разработкой и внедрением новых более эффективных способов дезинтеграции. Использование аппаратуры высокого уровня позволяет выявлять

причины нетехнологичности сырья и предлагать новые подходы для совершенствования оценок.

По той атмосфере, которая присутствовала во время работы семинара, можно констатировать, что технологическая минералогия стоит в авангарде современных направлений развития теории и практики обогащения руд. Это позволяет совершенствовать технологические процессы, разрабатывать и научно обосновывать новые технологические подходы и технические решения, новые технологии освоения тонкого вещества; интенсифицировать технологии обогащения различных руд на основе направленного изменения свойств минералов.

Участники семинара выразили сердечную благодарность руководству НПК «Механобр-Техника» за высокий уровень проведения научного семинара и хорошую организацию. Персонально поблагодарили Председателя Совета директоров и научного руководителя НПК «Механобр-техника» Леонида Абрамовича Вайсберга, ученого секретаря Нину Степановну Корниенко и директора по маркетингу Ивана Давыдовича Устинова.

В данный сборник включены в основном научные статьи по материалам семинара. Выпуск таких сборников стал традиционным, это восьмое издание.

Следующий девятый семинар по технологической минералогии было решено провести в апреле 2014 г. в г. Магнитогорске на базе Магнитогорского государственного технического университета (ФГБОУ ВПО «МГТУ»).

Признательность выражаем рецензенту генеральному директору НПК «Карбон-Шунгит», доктору технических наук Ю. К. Калинину.

СРАСТАНИЯ МИНЕРАЛОВ И СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РУД В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Пирогов Б. И.

ФГУП «ВИМС», г. Москва, pirogov_bi@inbox.ru

«По отдельной структуре руды редко можно судить о происхождении и истории рудного месторождения. Обычно наблюдается ряд структур, отражающих различные моменты развития и последующей истории месторождения» [Дж. Крейг и Д. Воган, 1983].

Почему Дж. Крейг и Д. Воган [1] при оценке генетической природы руды акцентируют внимание на структурах? Несомненно, это обусловлено тем, что именно в структурах и текстурах «замораживаются» все элементы заключительного этапа минералообразования, дающие представления о кристалломорфологии, гранулометрии, составе и структуре, свойствах, анатомии индивидов (зерен), границах контактирующих в сростаниях минералов. Задача минералога (геолога) в ретроспективном плане рассмотреть (умозрительно восстановить) природу формирования сростаний на различных этапах рудогенеза, что позволит технологу создать схему переработки руды, определив последовательность и стадийность технологических процессов и операций. При этом для сосуществующих минералов различных ассоциаций очень важно выявить, прежде всего, **природу их относительного возраста** и проследить эволюцию основных закономерностей изменчивости кристалломорфологии, конституции, свойств индивидов (зерен) сростаний минералов в гранулометрическом спектре. **Именно выявление и объяснение эволюционной природы структур – первичных и вторичных является важным шагом для понимания через сростания рудных и нерудных минералов происхождения руд и оценки их минералогических особенностей.**

Изучение и оценка природы сростаний минералов сегодня является одной из ведущих проблем технологической минералогии (ТМ) руд различных генетических типов. Поэтому внедрение в практику минералоготехнологической оценки руд учения Д. П. Григорьева об онтогении минералов позволило глубже понять как природу становления, так и изменения технологических свойств минералов (ТСМ). Именно онтогенический подход с

учетом данных технологического эксперимента, обеспечивает [2–4]:

а) оценку гетерогенности во взаимосвязи с особенностями конституции (состав-структура), **анатомии и свойств контактирующих минералов.** Это позволит предопределить теоретически возможное и технологически достижимое качество концентрата;

б) выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента, который отражает генетическую природу сростаний – гранулометрию, форму зерен сростающихся минералов, анатомию, особенности границ, физико-механических и физико-химических свойств. Как показывают исследования В. И. Ревнивцева и др. [5], Б. И. Пирогова и др. [6], Т. С. Юсупова и др. [7], особенности раскрытия минералов характеризуют пути повышения извлечения ценных компонентов руд на основе управления селективностью измельчения **с сохранением геометрической целостности раскрываемых минералов и их структурно-химических характеристик;**

в) оптимизацию технологического процесса с учетом контрастности свойств разделяемых минералов – на основе исследования особенностей неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (выявляются при комплексном минералогическом анализе анатомии индивидов и измельченных частиц), характера и направленности изменений тех или иных качеств минералов руд (ПИ в целом);

г) определение последовательности технологических операций с целью достижения наиболее эффективных условий разделения минералов, с учетом размерного фактора и морфолого-структурных характеристик вновь формирующихся малых частиц;

д) выделение при геолого (минералоге) – технологическом картировании типов и сортов руд, с получением их всесторонней минералоготехнологической характеристики. Это позволит определить направленность природных процессов минералообразования и изменений в технологии переработки, их роль в формировании основных вещественно-технологических

характеристиках руд различного генезиса, *отражающих эволюцию типоморфных признаков как минералов, так и руд в целом.*

*Опираясь в целом на исследования особенностей вещественного состава, текстурно-структурных признаков, физико-механических и физико-химических свойств руд различных генетических типов; законы минералогии – информационные, резонанса, инерции; учитывая взаимосвязи и во многом подобие между процессами минералообразования (преобразования) в Природе и Технологии; данные технологических экспериментов, мы формируем наши представления о ТСМ. При этом следует иметь в виду, что «жизнь», начатая в геологических процессах, продолжается в технологических аппаратах. Это отражает двоякую природу ТСМ [8]: с одной стороны, они определяются взаимосвязью с генезисом, конституцией и морфологией, с другой – изменениями морфологии, конституции минералов и, как следствие, природных свойств их при рудоподготовке и обогащении (в цепи МПИ → обогатительная фабрика → хвостохранилище). Здесь и появляется возможность получить прямую информацию о технологической онтогении (ТО) – генезисе технологической «жизни» минералов – *минеральных обломочных малых частиц (ОМЧ)* по данным изменчивости первичной морфологии и особенностей их кристаллохимии. Причем, надо иметь в виду, что длительность природных процессов, которые формируют ТСМ, до установления термодинамического равновесия исчисляется тысячелетиями. *Быстро же текущие технологические процессы, обусловленные производительностью аппаратов, интенсивно разрушая естественную информационную структуру минерала, медленнее передают ее новым продуктам процессов в более или менее сохранившемся виде* [9]. Согласно принципу наследования структурных, вещественных и морфологических признаков минералов, их технологических свойств (плотностные, магнитные, полупроводниковые, люминесцентные, флотационные и др.) потенциально проявляются в различных эволюционных рядах минералов (ассоциаций), отражающих непрерывное направленное развитие процессов минералогенеза (результат взаимодействия в различных энергетических полях минералов со средой). Этот принцип важно учитывать при разработке технологических схем, управлении ими. и модифицировании минералов.*

Весьма значимым моментом в развитии проблемы минералого-технологического подхода к исследованию руд явилось появление в 1962 г книги известного немецкого минералога П. Рамдора «Рудные минералы и их срастания». Он впервые широко осветил зарубежный опыт подхода к проблеме в специальной главе книги «Значение срастания минералов для обогащения», выразив суть проблемы в следующей фразе: *«подвергнуть ли руду механическому разделению, флотации после тончайшего размельчения, амальгамации, выщелачиванию или металлургической переработке, часто возможно решить после полного и тщательного изучения одного шлифа, в то время как без этого понадобится много бесполезных, отнимающих время и требующих затрат экспериментов»* [10]. Здесь явно звучит мысль, с одной стороны, о прямой зависимости технологических решений от глубины изучения вещества руды, с другой, – от уровня знаний исследователя. По мнению Рамдора, *именно изучение формы срастания может дать ответ на многие вопросы, связанные с обогащением руд:* о количестве сростков минералов при какой-либо избранной крупности измельчения, а величина срастаний, установленная статистически, – непосредственно указание на минимальную крупность измельчения. Поведение плоскостей срастания показывает (но не всегда), будут ли при этом зерна минералов раскрыты. Значительное увеличение количества сростков потребует дальнейшего измельчения. Все эти данные, несомненно, связаны между собой самым тесным образом. Именно в срастаниях, сочетающих в себе элементы текстурно-структурных и минеральных компонентов руды, он видел ведущий параметр конкретных технологических решений ее переработки. Рассматривая зарубежный опыт в целом, П. Рамдор отмечает, что обогатительные фирмы нередко держат в секрете результаты исследований минералогии руд по взаимосвязи с их обогатимостью. В то же время, как он справедливо подчеркивает *«почти каждая обогатительная проблема...требует особой методики по ходу работы: общих решений дать нельзя. Необычайно важное, даже решающее, в одном случае, может представлять в другом случае излишнюю работу»* [10]. В основу обобщений он включают ряд ведущих положений проблемы. Так, *микроскопическое изучение в отраженном свете может дать заключение:* о минерало-

гической природе компонентов; о структурных и текстурных особенностях; о количественных соотношениях минералов; о генетических особенностях руд и вытекающих из этого заключения о необходимом в будущем изменении обогащательного процесса (незначительные или сильные изменения в минеральном составе с глубиной). П. Рамдор особо подчеркивает значение подготовки образцов для оценки технологических характеристик срастаний рудных и нерудных минералов (подготовка безрельефных шлифов для минералогических исследований и возможности выкрашивания минералов включений за счет различий в твердости) с акцентом на их генетическую природу:

- парагенезис и физико-химические свойства соприкасающихся минералов, определяющие особенности их разделения при измельчении и обогащении;

- минералы сложного состава показывают в препаратах рудной микроскопии, что разделение их никогда не может быть полным за счет неизбежного количества промпродуктов со сростками. При этом особенно важно учитывать поведение благороднометалльной минерализации при измельчении и обогащении руд и ее взаимосвязей с различными минералами;

- различия в удельных весах носителей одного и того же металла при тонких прорастваниях могут обусловить промежуточные величины, позволяющие получать при гравитации различные результаты (например, в **Mn рудах, что четко выявляется рудной микроскопией**);

- удаление вредных примесей (например, носителей **P и S в железных рудах, As и W в оловянных рудах, Bi в свинцовых рудах**). Важно увязать с их генезисом – первичным и вторичным (например, согласно Швартцу [10], высокая S не может быть удалена из железной руды в связи с тем, что она связана не с сульфидами, а с сульфатами типа ярозита (возник за счет полного окисления сульфидов), который микроскопически легко может быть пропущен;

- важно удаление минералов, свойства которых затрудняют определенные методы обогащения (например, каолин и серицит при флотации; халькозин, почти исключаящий цианидное выщелачивание и т. д.), что требует их диагностики и характера проявления;

- по многим позициям в рудах принципиально значимы количественные подсчеты: *размеров зерен и срастаний минералов*, что позволит уста-

новить наиболее благоприятные условия измельчения руды; *определение минерального состава руд в целом*, особенно в связи с необходимостью оценивать распределение полезных металлов среди рудных и нерудных минералов; *определение количества и характера распределения выделений минералов благородных металлов в сырой руде с учетом granulometрии затруднено*, поэтому в решении проблемы помогают исследования продуктов обогащения; *часто возможны заключения о поведении парагенезисов и количестве рудного минерала в месторождении с глубиной*.

Книга Рамдора и сегодня представляет наиболее полные сведения о рудных и нередко сопутствующих им в парагенезисах нерудных минералах в отраженном свете, особенностях их конституции и свойств с акцентом на генетическую природу с учетом стадийности их изменений при различных процессах минералообразования. Именно это весьма значимо в минералого-технологической оценке (МТО) руд при обогащении.

Весьма интересная информация о связи рудной минералогии с обогащением руд приведена в работе Ю. Кэмерона 1961 г [11], в которой подчеркивалось, что «стоимость микроскопических исследований обычно более чем окупается исключением бесполезных операций и разработкой технологии, согласованной со *специфическими особенностями* вещественного состава и структуры руд. Подобно Клеопатре Шекспира, *руды металлов бесконечны в своем разнообразии*. Имеется мало «стандартных» методов обработки, и технология успешна только в том случае, если она согласована с минералогией и структурой руды». В ней всесторонне рассмотрены особенности проведения минералого-структурного анализа руд и продуктов обогащения, предложены таблицы и диаграммы для оценки точности анализа. Показано, что оба вида анализа выполняются в качестве контроля при обогащении на любой стадии процесса и, прежде всего, на начальных стадиях измельчения. С их помощью осуществляется периодический контроль операций для проверки эффективности извлечения или качества продуктов обогащения, а также для корректировки процесса обогащения. *В структурном анализе особое место отводится характеристике типов срастаний минералов и в том числе микросрастаниям*.

Несколько позже проявились работы Дж. Крейга, Д. Вогана [1] и М. П. Джонса [12], развивающие идеи ТМ по использованию комплекса методов МТО вещественного состава руд. В первой работе подчеркивалась, как и в более ранних исследованиях П. Рамдора и Ю. Кэмерона, значимая роль рудной микроскопии: **«если дробление и измельчение руд необходимы для того, чтобы подвергнуть минералы растворению, то рудная микроскопия важна для оценки и контроля эффективности цианирования или кислотного выщелачивания»**. Технология таких процессов относится скорее к области металлургии, а не обогащения, хотя термин **«минеральная технология» (mineral technology)** может охватывать оба процесса» [1]. Этот термин, несомненно, важен для понимания сути проблемы в целом. И здесь следует особо подчеркнуть, что в этой работе при характеристике ассоциаций минералов (с учетом генезиса) сопоставляются их природные структурные взаимоотношения с экспериментальными, полученными при изучении фазовых равновесий соответствующих систем. В ней приводится геометрическая классификация структур руд Амштутца [1] на примерах характерных графических изображений типов сростаний рудных и нерудных минералов с акцентом на морфологические особенности их границ, определяющих возможности высвобождения зерен рудных минералов при дроблении. Наряду с типом и размером сростаний, морфология границ показывает, происходит ли разрыв более крупных частиц по границам зерен. По данным микроскопии можно также судить о роли относительно разрывов и трещинок в самих рудных минералах. Авторы [1] подчеркивают, что такие структурные особенности влияют не только на процесс измельчения, но и значимы при обогащении руд методами флотации и выщелачивания. К сожалению, ничего не говорится о твердости контактирующих минералов, что крайне важно для оценки степени раскрытия сростаний. Достигнутая на каждой стадии дробления степень высвобождения минералов оценивается под микроскопом.

Морфология кристаллов (зерен) определяется формой поверхностей, отделяющих от окружающего пространства (среды минералообразования). При изучении поверхностей кристаллов можно получить информацию об их генетической природе, «жизни» на разных уровнях минералогической «памяти» и возможном поведе-

нии в различных технологических процессах. По работ известных минералогов и кристаллографов, обобщенных В. А. Поповым [13], индивиды (зерна) минералов в руде (порode) наиболее часто имеют сложные поверхности, среди которых по их происхождению (генезису) выделяются: 1) **идиоморфная** (собственная – плоскогранная); 2) **ксеноморфная** (чужая, отпечаточная); 3) **индукционная** (компромиссная); 4) **грануломорфная** (полиэдрическая); 5) **рекристалломорфная** (поверхность рекристаллизации); 6) **реоморфная** (пластической деформации); 7) **поверхности растворения жидкостями и газами**; 8) **поверхности дробления** (кластоформные); 9) **поверхности окатывания**; 10) **поверхности оплавления**.

В. А. Попов [13] подчеркивает, что в приведенной классификации поверхностей индивидов отражен общеминералогический методический подход с учетом кристаллографических, онтогенетических и микрокристалломорфологических классификаций поверхностей, т. е. в основу суждений о генезисе поверхностей минералов положены форма, анатомия и скульптура минеральных тел. Следует также иметь в виду замечания А. Г. Жабина [14] о том, **«что фазовые и субфазовые границы, обуславливающие пространственную дискретность индивидов, в минералогии чаще всего определяются как межзерновые границы»**. Несомненно, приведенная классификация поверхностей по В. А. Попову с учетом замечаний А. Г. Жабина, а также наших многолетних исследований по сростаниям и особенностям их раскрытия при различных методах измельчения [6, 15], имеет также и технологическое значение. Важно знать тип поверхностей вскрывающихся зерен при дроблении агрегатов для предсказания изменчивости их свойств в процессе технологической переработки минерального сырья (МС). В одних случаях вскрываются идиоморфные зерна минералов, в других – индукционные или ксеноморфные поверхности, в третьих – поверхности спайности, отдельности и пр. В то же время, как справедливо подчеркивает В. И. Силаев, опираясь на данные многочисленных экспериментов, [16] «все отмеченные типы границ являются проводниками и локальными аккумуляторами ксеногенных химических веществ, но особенно активны в этом отношении некогерентные границы, которые, в сущности, представляют собой интерстициальные пространства, выступающие как локальные среды специ-

фичного минералообразования». Как показали многочисленные исследования, поверхность индивида в силу физических и химических отличий от внутреннего объема минерала не остается пассивной, проявляя себя, как отдельная и весьма своеобразная среда минералообразования». Поэтому **при онтогеническом анализе сростаний следует рассматривать поверхность как особую функцию телесности индивидов**. Подтверждением тому являются исследования с помощью атомно-силовой микроскопии и раман-спектроскопии В. И. Силаева [16] поверхности граней алабандина открытого недавно нового типа марганцевых рудных месторождений. В результате им были выявлены на гранях наряду с наноступенчатым рельефом и ориентированными в одном направлении холмиками роста участки новообразованных пленок из сложно агрегированных глобул мезоанометрового размера. Пленки представлены гидроксидами марганца (пирохроит, манганит) и самородной серой, что расценено автором как признак формирования на поверхности алабандина **наномикрогетероструктур**.

Особенно остро проблема сростаний минералов для минералого-технологической оценки руд встала в 50–60 гг., когда в Криворожском бассейне началось обогащение бедных железных руд – магнетитовых разновидностей кварцитов – одного из важнейших и перспективных промышленных типов. В 1956 г. на базе Скелеватского Магнетитового месторождения была пущена 1-я очередь Южного ГОКа (ЮГОКа) с производительностью обогатительной фабрики (ОФ) по сырой руде 16 млн. т в год. Однако сразу же стало очевидно, что получить проектные показатели обогащения и, прежде всего, с качеством концентрата $Fe = 64\%$ и хвостами $Fe = 12\%$ не удастся. По секциям фабрики содержание Fe в концентрате и хвостах изменялось в пределах соответственно 59–62 % и 15–18 %. Было установлено, что магнетитовые разновидности кварциты (содержание $Fe = 34–37\%$) месторождения неоднородны и труднообогатимы, а схема обогащения и, прежде всего, по крупности измельчения не отвечает природе руды. Особенно четко это проявилось при обогащении разновидностей руд различных уступов карьера, существенно отличавшихся как по минеральному составу, текстурно-структурным признакам, так и по физико-механическим свойствам, что в конечном итоге сказывалось и на особенностях их обогатимости. В этот период (1958–1965 гг.) автор

статьи работал на комбинате в должности старшего петрографа (минералога) при главном геологе. В контакте с геологами, горняками, технологами пришлось решать целый комплекс задач по оценке вещественного состава железистых кварцитов, как бедных руд, на основе методологии выявления основных геолого-минералогических факторов (ГМФ), определяющих конкретные технологические характеристики и показатели обогащения руд с учетом их неоднородности. При проведении геолого-технологического картирования (ГТК) руд месторождения нами была разработана система из двух групп ГМФ [17]: **1) общегеологических и 2) минералого-петрографических и химических**. **1-я группа факторов** (стратегический уровень оценки и прогноза обогатимости) **опирается на генетическую природу руд** (характер и глубину метаморфизма толщ, преобразования их при метасоматозе и гипергенезе) **с учетом особенностей их геолого-структурной позиции**. **2-я группа (тактический уровень** оценки обогатимости) обеспечивает количественные показатели обогатимости руд в рамках конкретной технологической схемы их переработки. Весьма значимыми здесь становятся связи поведения рудных и нерудных минералов (измельченных до различной крупности) в технологической схеме как на стадии рудоподготовки, так и в режиме различных приемов сепарации и концентрации. Также удалось выявить при изучении сростаний минералов с учетом их физико-механических свойств особенности раскрытия рудных и нерудных минералов; изменчивость природных свойств минералов при измельчении с образованием тонких фракций и формированием флоккул, осложняющих режимы сепарации и концентрации минералов различной granulometрии. В результате углубленного изучения вещественного состава руд месторождения с учетом минералого-технологических данных детальной и эксплуатационной разведки впервые было проведено ГТК руд месторождения. С использованием разработанной нами диаграммы [17] изменчивости состава руд по зависимости между коэффициентами магнитности $[K_M = Fe_{MG}:Fe]$ и окисленности $[K_{OK} = Fe_2O_3:(FeO+Fe_2O_3)]$; и минералого-технологической классификации были выделены в толще железистых кварцитов (горизонт $K_2^{4Ж}$ средней железорудной свиты) основные минералого-технологические сорта руд с учетом содержания в них, кроме магнетита, также гематита, Fe -содержащих

карбонатов и силикатов. В соответствии с зональностью толщи от центра симметрично к сланцевым горизонтам висячего и лежачего бока располагались разновидности гематит-магнетитовых, собственно магнетитовых, силикат-карбонат-магнетитовых и магнетит-карбонат-силикатных разновидностей кварцитов. На базе карты были отстроены геолого-технологические планы добычных уступов карьера, с помощью которых осуществлялось усреднение 4-х основных сортов руд при подаче их на ОФ. В целом, информация о проведенных работах на ЮГОКе отражена в многочисленных публикациях автора [6, 17 и др.]. В конечном итоге все новые материалы по выявлению закономерностей изменчивости минералого-технологических особенностей бедных магнетитовых руд месторождения были использованы институтами Механобр и Механобрчермет при последующих реконструкциях технологических режимов на ОФ комбината в связи с совершенствованием технологии их измельчения и обогащения. Совершенно очевидно, что при этом весьма значимой характеристикой для оценки роли текстурно-структурных признаков руд в связи с их обогатимостью *становится проблема изучения типов сростаний минералов*. В таблице 1 дана характеристика основных типов сростаний по железистым кварцитам докембрия разрабатываемых месторождений СССР [9]. Выделены **3 типа сростаний по морфологии** с учетом степени их сложности и связи с обогащением, а с учетом *генетической природы формирования границ сростаний* по последовательности образования контактирующих минералов приводятся сведения также *еще о 4-х типах*, дополняющих конкретные данные о связи с обогащением. В частности, нами [6, 9, 18] разработана специальная методика по выявлению ширины шва на границе сростающихся минералов (травление $\text{HCl}_{\text{конц}}$ в аншлифах). Дополняя данные табл. 1, необходимо отметить, что: 1) *пойкилитовые сростания* дополнительно подразделяются по размерам включений на – *крупновкрапленные* (размер вкрапленников 0,05–0,07 мм), *средневкрапленные* (0,03–0,05 мм) и *тонковкрапленные* (0,01–0,001 мм и менее).

Форма вкрапленников обычно округлая или в разной степени идиоморфная. Вкрапленность также подразделяется на равномерную или весьма неравномерную, а по интенсивности – на весьма интенсивную (в ср. 75 % пло-

щади зерна или агрегата занято вкрапленниками), интенсивную (50 %), среднюю (25 %) и редкую (10 %). Этот тип сростаний образует при измельчении различные типы сростков в той или иной степени, осложняющие сепарацию измельченной руды; 2) *мирмекитоподобные сростания* напоминают субграфические структуры (например, магнетит или гематит с кварцем). Этот тип сростаний существенно осложняет процессы различных видов сепарации за счет формирования «трудных» сростков, которые разубоживают концентраты; 3) *особые формы сростаний*, обусловленные замещением и катаклазом минералов. Этот тип сростаний наиболее сложный для изучения и требует весьма внимательного генетического подхода, так как порождает при измельчении руд разнообразные типы сростков, существенно сказывающиеся на эффективности разных процессов сепарации. ***В целом изучение типов сростаний с учетом генетической природы руд при оценке показателей раскрытия минералов обеспечивает не только контроль эффективности их обогащения в различных узлах технологической схемы, но и позволяет определить перспективы совершенствования технологии.***

Исследуя морфологию, особенности конституции индивидов и агрегатов рудных минералов, сростаний с другими минералами важно выразить телесно изменчивость и эволюцию их технологических свойств и признаков с использованием комплекса современных методов анализа: визуализации изображений, РВТВ (рентгеновской вычислительной микротомографии – при послойном сканировании объекта выявляются особенности распределения минеральных фаз: форма и размеры, характер сростаний и др.), ЭМ и РЭМ, ИКС, РКФА, ЯГРС, ЯМР, ЭПР, ИТЛ, ТЭДС, КФА, термохимический, люминесцентный, радиографический, рентгеноспектральный, микрозондовый (протонный), термобарогеохимический и др. Это позволяет глубже проникнуть в природу свойств контактирующих минералов, а в конечном итоге определить степень контрастности измельченных зерен при сепарации, в целом возможности управления процессами обогащения, а также предложить методы селективного выделения минералов с использованием новых систем рудоподготовки и обогащения ПИ.

Таблица 1

Классификация сростаний минералов в железистых кварцитах докембрия

Морфологические типы срастаний					
А – простые		Б – сложные		В – весьма сложные	
субидиоморфные	ксеноморфные	пойкилитовые	мирмекитоподобные	замещения	катакластические
Формы срastaющих зерен правильные, границы срастаний ровные	Ксеноморфные зерна, границы срастаний криволинейные, извилистые, зазубренные	Зерна одного минерала (округлые, реже идиоморфные) наблюдаются в виде включений в другом	Зерна минералов, проникая друг в друга, тесно срastaются между собой	Сложные срastaния зерен, обусловленные замещением минералов вплоть до полных псевдоморфоз	Срastaющиеся зерна и агрегаты характеризующиеся различной степенью дробления и сложными взаимоотношениями
Связь с обогащением					
При измельчении легко- и среднераскрываемые Различные по качеству высокосортные концентраты Потери минимальны		Труднораскрываемые Концентраты разубожены «трудными» сростками Потери небольшие		Весьма труднораскрываемые Концентраты весьма неустойчивы по качеству Потери значительные	
Типы срастаний по последовательности образования					
одновременные	частично одновременные	последовательные		ложные	
Между минералами проявлены индукционные грани, границы извилистые и дугообразные, ширина шва с углублением метаморфизма уменьшается с 4,0 до 1,5 мкм	Индукционные грани проявлены частично, границы резко выражены, участками неясные, ширина шва непостоянна	Индукционных граней нет, границы резко выражены, ровные и слабо извилистые, ширина шва уменьшается с углублением метаморфизма с 1,5 до 0,5 мкм		Морфология границ разнообразна, границы ложные, ширина шва изменяется в широких пределах	
Связь с обогащением					
При измельчении раскрытие минералов изменяется в зависимости от ширины шва и морфологии границ Качество концентрата стабилизируется Потери возрастают				Раскрытие неустойчиво, нередко переизмельчение минералов Разубоживание концентратов в связи с повышенной флокуляцией частиц Потери значительные	

Компьютерная обработка полученной информации дает представление об оценке онтогении, типоморфных признаков и свойств минералов, роли выявленных тонких особенностей их конституции в конкретных минеральных ассоциациях; закономерностей изменчивости минералов с учетом экспериментальных технологических данных в определенном морфолого-структурном ряду. В итоге такая информация позволяет корректно оценивать в целом обогатимость рудных и нерудных ПИ.

На рис. 1 показано в железистых кварцитах различных месторождений (фаций метаморфизма) широкое разнообразие сростаний кварца и силикатов с индивидами и агрегатами магнетита различной степени идиоморфизма, с учетом сим-

метрии, размера, внутреннего строения со следами дробления, растворения и четкого проявлением морфологии границ на заключительном этапе кристаллизации. Уже по рисунку можно увидеть, сколь разнообразен и изменчив морфоструктурный характер взаимоотношений контактирующих минералов в зависимости от эволюции РТС-условий кристаллизации, изменчивости симметрии среды, характера проявлений деструктивных явлений.

Совершенно очевидно, что без проведения таких наблюдений невозможно четкое представление об особенностях раскрытия сростаний минералов при измельчении. В тоже время, следует параллельно проводить изучение сростаний на анатомических срезах индивидов магнетита,

позволяющих получить дополнительную информацию об особенностях неоднородности внутреннего строения минерала по количеству особенностям проявления различного рода нерудных включений, продуктов распада твердого раствора, замещений (псевдоморфизация, окисле-

ние) с использованием методов травления, определения микротвердости, величины ТЭДС и др. На рис. 2 отражены особенности неоднородности зерен магнетита в сростаниях с кварцем в железистых кварцитах фации метаморфизма зеленых сланцев.

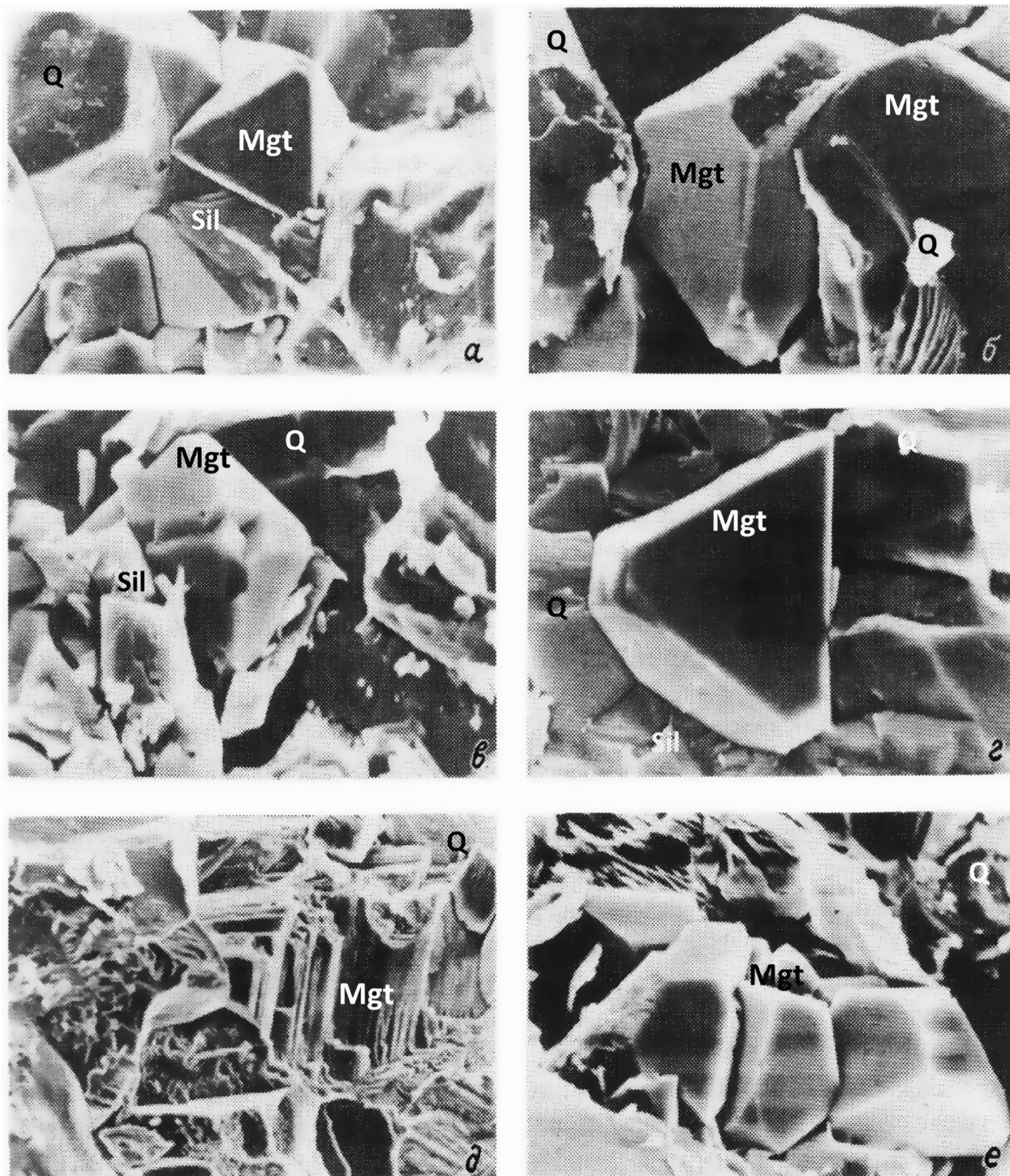


Рис. 1. Морфоструктурные особенности сростаний кварца и силикатов с магнетитом железистых кварцитов зеленосланцевой (а-д) амфиболитовой (е) фации метаморфизма (поданным РЭМ, ув. а – д – 1400; е – 700).

Месторождения: а, б – Кривой Рог, Большая Глееватка; е – Первомайское; г, д – Скелеватское; КМА – е – Лебединское

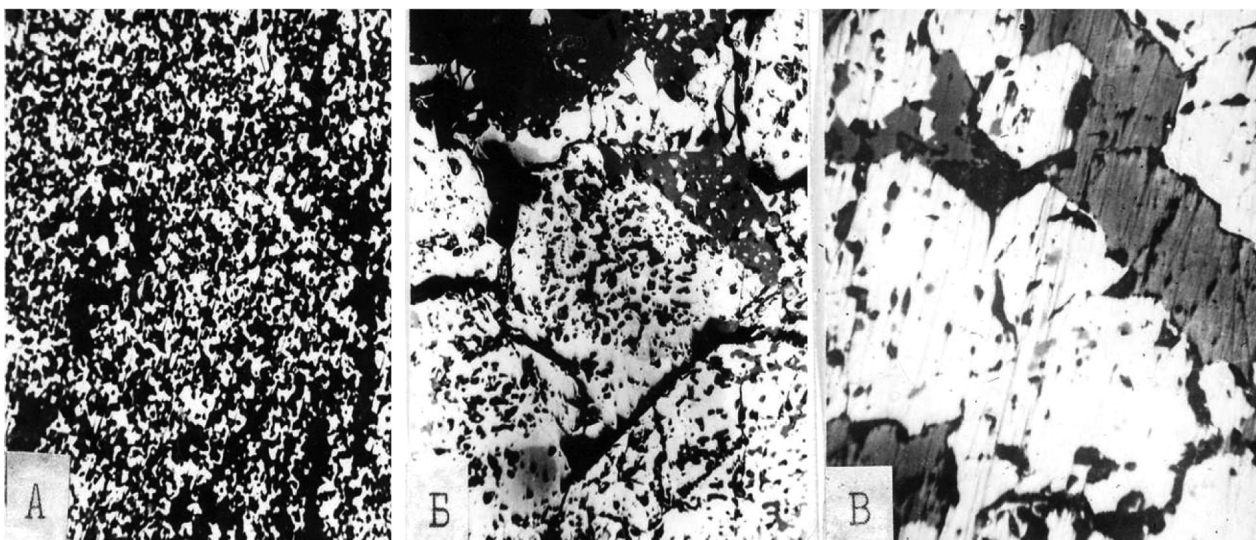


Рис. 2. Типы сростаний магнетита и кварца железистых кварцитов фации зеленых сланцев на анатомических срезах ксено- и идиобластических зерен: (А – мирмекитовый, Б – пойкилитовый, В – субидиоморфный типы сростаний). Склеватское месторождение (Кривой Рог, ЮГОК). Свет отраженный: белое – магнетит, черное и серое – кварц, николи II, увеличение 100

Как отмечалось нами ранее [6], из кварцитов с такими типами сростаний получены концентраты с содержанием Fe соответственно: 58,1–63,8–67,8 % (при конечной крупности измельчения 95 % класса 0,074 мм).

Исследование микротвердости контактирующих минералов и границ их сростаний в аншлифах позволяет говорить о некоторых общих закономерностях:

- существенно изменяется микротвердость (особенно характер ее распределения – гистограммы) для сростаний магнетит – кварц: прослеживается смещение значений то в область, то магнетита. Это существенно влияет на изменение способности раскрытия и соответственно ведет к переизмельчению в разной степени то кварца, то магнетита. Именно такой тип сростаний с учетом гранулометрии и последовательности образования минералов может влиять на снижение качества магнетитового концентрата;

- прослеживается четкая обратная связь между шириной шва и микротвердостью границы сростаний: с увеличением ширины шва значения микротвердости приконтактной зоны уменьшаются. Понижение прочности сростающихся минералов обусловлено различием их кристаллографической ориентировки и изменением физико-механических свойств самих минералов;

- изучение последовательности выделений кварца и магнетита в сростаниях свидетельствует прежде всего о возможности их совместного роста. В тоже время в железистых кварцитах

(бедных железных рудах) на ширину шва между минералами границы сростаний влияют степень метаморфизма и метасоматоза, сопровождаемые микротектоникой, что сказывается на раскрытии минералов при измельчении и обогатимости руд в целом. Особенно четко это фиксируется на ГОКах.

На рис. 3 отражен характер изменчивости ширины шва в кварцитах различных месторождений по значительному количеству представительных образцов.

Анализ данных рисунка позволяет высказать ряд соображений об особенностях раскрытия руд с учетом различий по крупности их измельчения. Конечная крупность составила соответственно: 95 % класса 0,074 мм для руд месторождений 3–4; 75 % для руд 2; 95 % класса 0,044 мм для руд 1. Это обусловлено тем, что:

- разброс величин по ширине шва в сростаниях отражает прежде всего длительность и разнообразие процессов формирования руд с учетом конкретной геолого-структурной позиции месторождений (стратиграфия, тектоника, морфология рудных тел и т. д.), повлиявших на особенности минералогии, перекристаллизации, текстуры и структуры, характер взаимоотношений минералов, роль вторичных проявлений, физико-механические свойства и др. ;

- чем четче проявляется механизм совместного роста минералов, в том числе и с учетом перекристаллизации (не отстает перекристаллизация кварца от магнетита), тем меньше размер шва

на контакте минералов (субидиоморфный тип срастаний за счет выравнивания контура границы). При этом образуются и более хрупкие зерна кварца, что повышает их степень раскрытия по сравнению с пластичным магнетитом, несмотря на то, что размер шва существенно уменьшается (2 – ОГОК, а также частично 4 – ЮГОК);

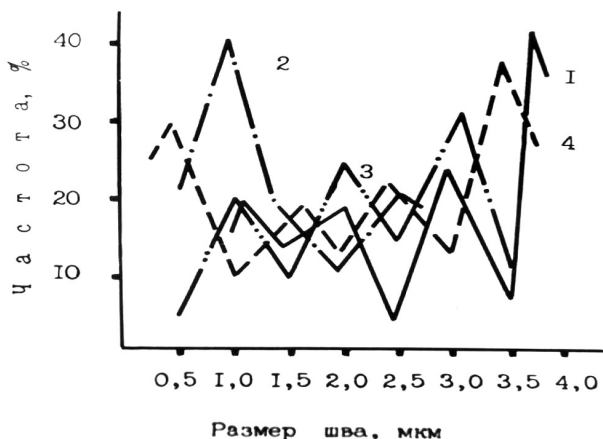


Рис. 3. Изменчивость ширины шва срастаний кварца и магнетита железистых кварцитов различных фаций метаморфизма (фации зеленых сланцев – 1, 4 и амфиболитовая – 2, 3) по месторождениям: 1 – Михайловское (МГОК), 2 – Оленегорское (ОГОК), 3 – Ималыкское, 4 – Скелеватское Магнетитовое (ЮГОК)

– значительное увеличение размера шва в образцах ЮГОК – 4 связано с проявлением «ложных» срастаний магнетита с карбонатом (за счет замещения кварца на контакте карбонатом при метасоматозе). В итоге резко возрастает раскрытие магнетита и соответственно повышается качество концентрата по Fe на 2–4 %. В целом за счет проявления микротектонических трещин на контакте мартитизированного магнетита с кварцем при силикатном метасоматозе в образцах – 1 руд Ималыкского месторождения (фация амфиболитовая) обеспечивается хорошее раскрытие и содержание Fe в концентрате составляет 65–66 %, хотя с магнитными флокулами в концентрат частично вовлекаются переизмельченные нерудные частицы;

– наиболее контрастное положение по отношению друг к другу занимают кривые 1 (МГОК) и 2 (ОГОК), подчеркивающие отличия фациальной природы кварцитов (для руд МГОК характерны вулканогенно-осадочные фации, а для ОГОК – существенно осадочно-химические). Руды МГОК представлены кварцитами джеспилитовой формации с развитием процессов карбонатного и щелочного метасоматоза, сопровождаемых рекристаллизацией магнетита и образованием значитель-

ного количества маггемита (тип срастаний сложный). При тонком измельчении руд возникает значительное количество флокул (вторичных, техногенных агрегатов ОМЧ) с затягиванием при магнитной сепарации большого количества нерудного материала в концентрат, что подробно рассматривалось нами ранее [6].

В конечном итоге, следует отметить, что, чем более неоднородны зерна магнетита (слабо метаморфизованные с интенсивно проявленным метасоматозом кварцита), тем шире диапазон изменений размеров шва срастаний. Величина коэффициента вариации ширины шва срастающихся минералов кварцитов всех месторождений изменяется в широком диапазоне (55–76). Она уменьшается от железистых кварцитов зеленосланцевой фации метаморфизма к амфиболитовой, расширяясь за счет вторичных проявлений. Чрезвычайно сложна анатомия магнетитов железистых кварцитов блокового и мозаично-блокового строения, особенно в связи с проявлением микротектоники, приводящим к образованию весьма тонкозернистых (порошковатых) зон-блоков в индивидах (зернах). При этом резко возрастает неоднородность выделений магнетита по микротвердости, а, как следствие, изменяются магнитные свойства ОМЧ, увеличивая потери в хвостах магнитной сепарации тонких частиц минерала, утративших магнитные свойства [6]. Весьма неоднородны выделения магнетита и гематита с незавершенными процессами соответственно мартитизации и мушкетовитизации, образуя сложные микросрастания, осложняющие процессы магнитной сепарации, как это показано нами ранее для кварцитов МГОКа [6] по данным терромагнитных и микрозондовых анализов.

Предложенная классификация типов срастаний минералов железистых кварцитов широко используется при оценке обогатимости руд других генетических типов с учетом некоторых дополнений. Изучение онтогении магнетитов руд в срастаниях с различными нерудными минералами выявляет нередко довольно сложное анатомическое внутреннее строение кристаллов и агрегатов; проявление зонального, секториального, мозаично-блокового строения со следами роста и растворения на гранях кристаллов, разнообразными деформационными изменениями. Это позволяет проследить эволюцию субидиоморфных и ксеноморфных типов срастаний с преобразованием в более сложные типы, связанных с многоэтапностью процессов минералообразования. Это

особенно четко проявляется в анатомии кристаллов (зерен) магнетита и сосуществующих с ним в контакте нерудных минералов.

Например, из комплексных бадделеит-апатит-магнетитовых руд Ковдора, связанных с карбонатами, на КГОКе получают магнетитовый, апатитовый и бадделеитовый концентраты. При МТО руд нами [6, 19] для выявления степени неоднородности магнетитов и апатитов, определяющих качество соответствующих концентратов, был использован широкий комплекс прецизионных методов анализа (ЭМ, МРСА, ТЭДС, ИКС и др.) на основе препаратов оптико-минералогических исследований. Принципиальную роль в определении качества обра-

зующихся при измельчении ОМЧ играют исследования **микросрастаний минералов** на анатомических срезах. В магнетите выявлены тонкие продукты распада твердого раствора ильменита и герцинита (рис. 4), а нередко и с ульвошпинелью, что обуславливает повышенное содержание Ti и Mg в минерале, а соответственно и в концентрате. Причины повышенного содержания Mg в апатитовом флотационном концентрате на комбинате обычно связывали с вовлечением частичек доломита, обладающего близкими флотационными свойствами с апатитом. Нам же удалось выявить при ЭМ исследованиях содержание весьма тонких (нм) включений форстерита (рис. 4).

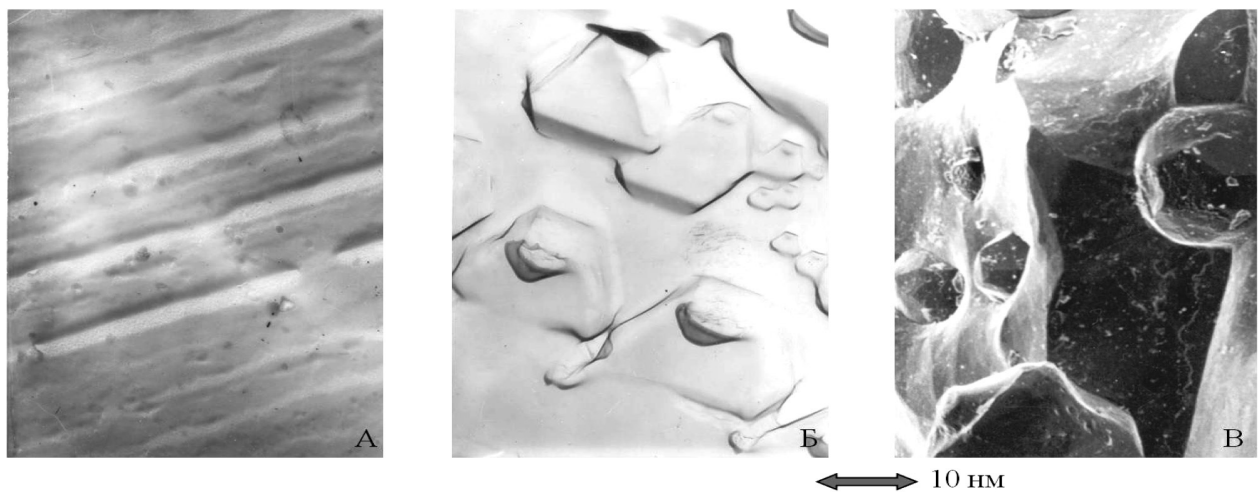


Рис. 4. Особенности микросрастаний минералов на наноуровне: наноблоки ильменита (А) и шпинели (Б) в матрице магнетита и форстерита (В) в апатите руд Ковдора (ЭМ, угольная реплика)

Более детально эволюция МТО магнетитов Ковдора (состав, свойства) была рассмотрена нами в работах [6, 18]. В целом, дополнения, приведенные на рисунке 4, позволяют оценить характер проявления микросрастаний минералов на наноуровне, дать геологам и технологам дополнительную информацию по особенностям неоднородности индивидуальных (зерен) минералов в связи с выявлением генетической природы руд и поведением минералов в отдельных узлах технологической схемы.

Для срастаний магнетитов руд контактово-метасоматического и гидротермального генезиса весьма характерно проявление в анатомических срезах зональных, скелетных и секториальных кристаллов. Причем, длительные низкотемпературные преобразования, сопровождаемые неоднократным дроблением, обусловили тонкозернистое внутреннее строение магнетитов. Как показывают наблюдения в просвечи-

вающем ЭМ, даже в пределах площади зерна 1 мкм^2 , в таких магнетитах отмечаются весьма тонкие включения серпентина, хлорита, кварца и других минералов. Одной из причин крайней неоднородности кристаллов, по мнению Мазурова М. П., может быть различная скорость растворения и перекристаллизации магнетита и силикатов, особенно в связи со скелетными формами кристаллов. Это обуславливает сложный тип микросрастаний, затрудняющих раскрытие минералов и снижающих соответственно качество концентрата при увеличении потерь весьма тонких ОМЧ магнетита при сепарации. Сферолитовые образования магнетитов Коршунского месторождения также отличаются микроблочным зональным строением с высокой степенью неоднородности.

Весьма сложные типы срастаний минералов характерны для титаномagnetитовых руд

магматического генезиса в связи с проявлением структур распада твердого раствора в матрице магнетита. Явления распада твердых растворов могут быть как сравнительно простыми, так и достаточно сложными – многоступенчатыми [10, 19, 20, 21 и др.]. Реконструкция таких сложных сростаний требует применения онтогенических приемов исследования. При определении химического состава *ретроспективных индивидов* [12] необходимо учитывать включения тел распада твердых растворов. Какими же в связи с этим морфологические признаки распада твердых растворов? По мнению В. С. Урусова [22], после кристаллизации минералы могут претерпевать два разных изменения за счет диффузии атомов в твердом теле – *упорядочение и распад твердого раствора*. Теоретически распад твердого раствора происходит двумя способами: 1) зарождение и рост кристаллов нового минерала в матрице (*бинодальный распад*), 2) возникновение флуктуации состава в матрице без границы раздела минералов (*спинодальный распад*). Распад титаномагнетитов связан с бинодальным распадом, следствием которого являются выросшие индивиды минералов. Тела распада твердого раствора и матрица могут относиться к разным минеральным видам (магнетит-ильменит) или к контрастно различающимся по составу «минералам» одного изоморфного ряда (магнетит-ульвошпинель; магнетит-магнезиоферрит, Ковдор). Тела распада расположены в матрице кристаллографически определенным образом, причем может наблюдаться строгое когерентное сопряжение структур либо частичное соответствие некоторых элементов структур разных минералов. Многоступенчатость распада и послераспадовая миграция границ создают иногда довольно сложную картину взаимоотношений минералов. Встречаются случаи, когда распад сопровождается полиморфными (магнетит-маггемит; магнетит-кульсонит) и другие превращения в минералах (образование сложных псевдоморфоз). Суммируя данные многих исследователей по проблеме распада, В. А. Попов [13] сформулировал понятия об основных морфологических признаках распада твердого раствора. **Пространственное положение.** Тела распада имеют определенную кристаллографическую ориентировку в кристалле-матрице. В первично зональных и секториальных кристаллах тела распада распределе-

ны также зонально и секториально при *одинаковой* ориентировке во всех пирамидах нарастания кристалла-матрицы. По этому признаку можно отличить структуры распада от других групповых структур (синтаксических, унаследованных, замещения). Если дислокационная предраспадовая структура однородна, то и тела распада распределяются равномерно. *Если же дислокационная структура резко неоднородна (имеются полосы или участки пластических деформаций, ростовые напряжения и т. п.), то изменяется и картина распада (большое количество дислокаций одного знака может привести к миграции компонентов на далекие расстояния к порам, трещинам, границам кристаллов)*. Наконец, тела распада не переходят из одного кристалла-матрицы в другой. В то же время известно, что при обычном метасоматозе метакристаллы могут одновременно развиваться по нескольким соприкасающимся индивидам. **Форма тел распада.** П. Рамдор [10] охарактеризовал разные формы тел распада: совершенно неправильные формы; эмульсиевидные округлые выделения; эмульсиевидные выделения правильной формы; пластинчатые; решетчатые; скелетные; перистые; филигранные структуры; червеобразные и гирляндные формы; мирмекиты или графические структуры. Следует согласиться с В. А. Поповым, что такая классификация-перечисление неудачно отражает собственно распад твердых растворов. По-видимому, для случаев, когда после распада границы индивидов не двигались, **формами тел распада являются пластинки** (изометричные в плоскости или вытянутые в одном направлении в зависимости от структурных особенностей матрицы) либо **плоские линзы**, которые и следует рассматривать как собственные формы тел распада твердого раствора. Необходимо также учитывать, что вследствие более поздних деформаций миграция границ тел распада может привести к смешению морфологических признаков разных явлений. В частности, движение границ тел распада в связи с напряжением в матрице и телах распада могут привести к разделению пластинок на части, изометризации их, но это уже формы тел, связанные с процессом полной или частичной послераспадовой перекристаллизацией. Следует также учитывать, что при наложении на индивиды структур распада твердых растворов метасоматических процессов происходит **развал**

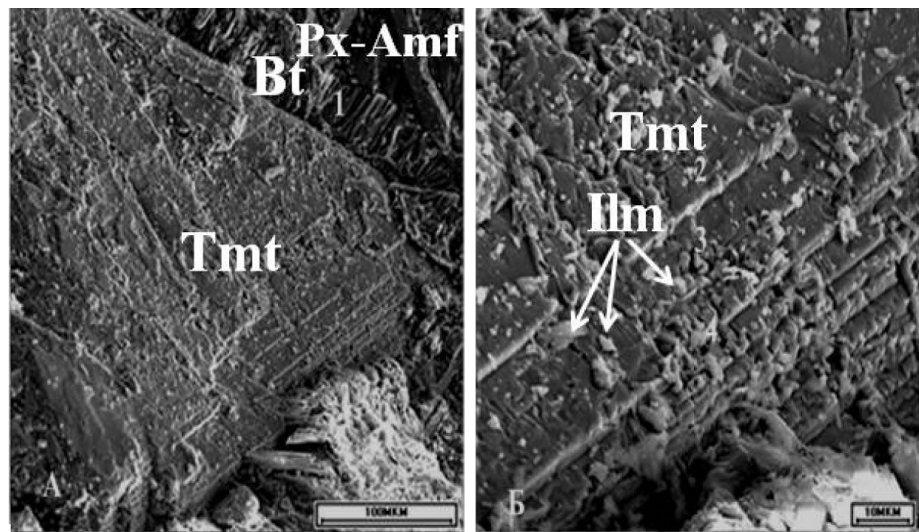
твердых растворов с образованием **агрегатных – сложных псевдоморфоз**.

По проведенному обобщению В. А. Поповым [13], П. Рамдор [10] предложил различать «простой распад», «сложный распад» и «полное преобразование минерального состава». Его «сложный распад» соответствует полиминеральному распаду, когда матрица продуцирует несколько минералов. При этом тельца распада всех минералов являются по форме идиоморфными пластинками, которые могут располагаться по разным кристаллографическим плоскостям матрицы. А «полное преобразование минерального состава» соответствует «развалу» минерала, причем новые минералы имеют друг с другом

индукционные поверхности одновременного роста (частично аналогичны графическим структурам, синтаксии минералов) и общий химический состав смеси соответствует стехиометрии исходного (ретроспективного) минерала.

Нами при изучении структур распада в титаномagnetитах руд Пудожгорского месторождения (Республика Карелия) удалось проследить особенности формирования сростаний минералов на двух уровнях – в объемных препаратах по кристалломорфологии (РЭМ) и в плоских анатомических срезах по анатомии как по микроморфологии зерен, так и их составу (МРСА). На рис. 5 показаны взаимоотношения кристаллов титаномagnetита и агрегатов силикатов.

Рис. 5. Морфологические особенности выделений и взаимоотношений титаномagnetита с биотитом (А), ильменита (тонкие частицы) с биотитом (РЭМ, в обратно-рассеянных электронах. Б – деталь А). Пудожгорское месторождение. Аналитик Ружицкий В. В.



Фрагменты рисунка отражают как ростовую морфологию (А) кристаллов титаномagnetита (уплощенных перпендикулярно оси третьего порядка), так и характер, проявления в объеме продуктов распада твердого раствора магнетит-ильменит и включений силикатов (Б) по плоскостям отдельности (псевдо-спайности) основного минерала. Видны размеры и закономерности расположения (с учетом симметрии) тонких минеральных частиц ильменита; микротрещины, особенности обрастания рудного минерала пластинками биотита и агрегатом пироксена-амфибола (субидиоморфные и ксеноморфные сростания). Замещение пироксен-амфиболовых агрегатов на контакте с рудным минералом биотитом приводит к образованию ложного типа сростаний. С одной стороны, кристаллы титаномagnetита будут легко раскрываться, с другой – они же при измельчении будут образовывать различные по морфологии и размеру измель-

ченные частицы, затрудняющие процессы сепарации в связи с формированием рудно-силикатных флокул. При этом также частично будут раскрываться тонкие зерна ильменита.

Исследование микросростаний минералов в матрице титаномagnetита, приведенное на рис. 6 (анатомические срезы индивидов, МРСА), показало, что:

- зерна титаномagnetита характеризуются высоким уровнем неоднородности, обусловленным как размером весьма тонких выделений продуктов многостадийного распада твердых растворов (ульвошпинель, ильменит, ильменит), так и захваченных при кристаллизации нерудных минералов, что привело их к микроблочковому строению (А). Кроме того, наблюдается по трещинам отдельности титаномagnetита образование тонких выделений ильменита, нередко с последующей перекристаллизацией в более крупные пластины (Б) и даже отдельные выделения титанита;

– при аутометасоматозе иногда наблюдается очищение зерен титаномагнетита (В) от продуктов распада с образованием отдельных блоков и зональных выделений, а также крупных зерен ильменита. Причем, на контакте с «очищенным» рудным минералом и плагиоклазом также образуется титанит;

– за счет выявленной генетической эволюции микрокрастаний титаномагнетита руд наблюдаются закономерные изменения в его со-

ставе, позволившие с использованием данных МРСА выделить три разновидности основного рудного минерала: высоко-, средне- и низкотитанистый (В-, С-, Н-Тмт);

– такое подразделение титаномагнетитов руд месторождения отражает как сложную генетическую, так и технологическую природу минерала.

Полная характеристика состава 3-х основных разновидностей титаномагнетитов руд различного уровня неоднородности дана в таблице рис. 6.

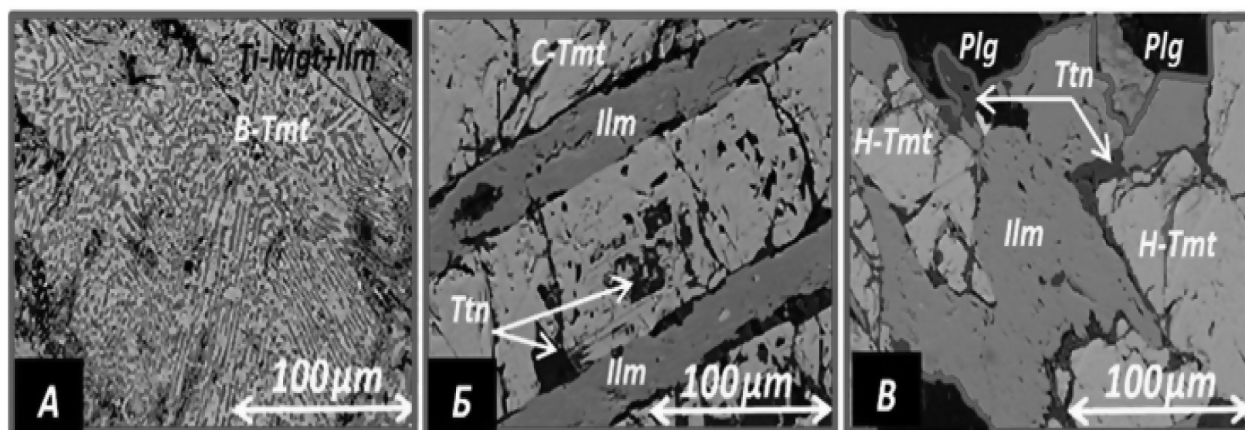


Рисунок и вид анализа	Fe _{общ}	Fe ^(II) , %	Fe ^(III) , %	Ti, %	V, %	FeO, %	Fe ₂ O ₃ , %	Fe ₃ O ₄ , %	TiO ₂ , %	V ₂ O ₅ , %	kTi	kV
Площадь А	58,75	24,33	34,42	10,51	1,07	31,32	49,23	80,55	17,54	1,91	29,85	3,26
Площадь Б	58,67	23,63	35,04	10,72	0,88	30,41	50,13	80,54	17,88	1,57	30,48	2,68
Площадь В	53,26	23,47	29,79	15,53	0,71	30,20	42,62	72,83	25,90	1,27	48,62	2,39
Средние по точечным измерениям в тех же площадях: В-Тмт (А)	57,55	24,34	33,22	10,44	0,99	31,32	47,52	79,54	17,54	1,71	30,48	2,97
Средние по точечным измерениям в тех же площадях: С-Тмт (Б)	62,84	23,95	38,89	6,67	1,28	30,83	55,63	86,84	11,21	1,88	17,84	2,99
Средние по точечным измерениям в тех же площадях: Н-Тмт (В)	68,86	24,53	44,33	1,70	1,46	31,57	63,42	95,16	2,86	2,15	4,15	3,12

Рис. 6. Особенности минералого-технологической эволюции состава основных разновидностей титаномагнетитов (по данным МРСА) руд Пудожгорского месторождения в ассоциации с нерудными минералами.

Аналитик Быстров И. Г.

– Для получения более достоверной МТО титаномагнетитовых руд необходимо применять разработанную нами [23] методику площадного определения элементного состава «рудного» минерала, как полиминерального микроагрегата (микрокрастания). Она позволяет учитывать

особенности изменчивости состава минерала в связи с поведением его зерен и обломочных малых частиц (ОМЧ) в различных узлах технологической схемы. При этом, наряду с абсолютными значениями содержания наиболее значимых элементов (Fe, Ti, V), при расчетах использовались

и их относительные величины в виде двух коэффициентов: титанистости – $K_{Ti} = TiO_2/Fe = 0, n. . = n \cdot 10^{-2}$ и ванадистости – $K_{V} = V_2O_5/Fe = 0, n. . = n \cdot 10^{-2}$ (табл. рис. 6). Это позволяет более корректно оценить степень изменчивости состава минерала – его зерен и ОМЧ при обогащении руд., давая возможность проследить особенности эволюции состава титаномагнетитов в рудах.

При минералого-технологической оценке руд также очень важно увязывать их текстурно-структурные характеристики со структурным анализом продуктов обогащения. Оптико-минералогическое изучение в комплексе с прецизионными методами анализа обеспечивает общие представления о текстурах и структурах руд (характер взаимоотношения, последовательность выделений, морфология индивидов – зерен и агрегатов, основные типы сростаний минералов), степени неоднородности основных минералов (РЭМ, МРСА, ЯГРС, рентгеновская микротомография, микрохимическое травление, ТЭДС, микротвердость и др.), и в целом обеспечивает данные об особенностях их обогащаемости. По представительным образцам проб руд с помощью оптико-геометрического анализа (ОГА) возможно также получить дополнительные сведения об особенностях гранулярного состава рудных и нерудных минералов, некоторых

других их характеристиках и в конечном итоге о начальной крупности измельчения.

Рассмотрим возможности проведения структурного анализа на примере изучения пробы бедных ($Fe = 16–18 \%$) малотитанистых, ванадий-содержащих титаномагнетит-пироксенитовых руд Собственно Качканарского месторождения (Урал). При этом используются следующие данные: минеральный состав представительной пробы измельченной руды (табл. 2), морфолого-структурные особенности измельченной и данные ОГА исходной руды (рис. 7, 8), раскрытия минералов по классам крупности руды (табл. 3 и рис. 10).

Анализ всех приведенных данных следует начинать с представлений о минеральном составе руды в целом и оценки особенностей их перераспределения в каждом классе крупности отдельно. Именно здесь концентрированно отражаются, как морфоструктурные характеристики минералов, так и различия в их физико-механических свойствах. Четко просматриваются отличия в перераспределении рудных минералов и силикатов по сравнению с содержанием их в исходной руде. Если в самом крупном классе содержание титаномагнетита составляет $27,7 \%$ (почти на 2 порядка выше, чем в исходной руде), то по другим классам оно ниже на 2–3 порядка, а свободный ильменит сконцентрирован только в классе $-0,2+0,074$ мм.

Таблица 2

Минеральный состав пробы исходной руды крупностью 1 мм

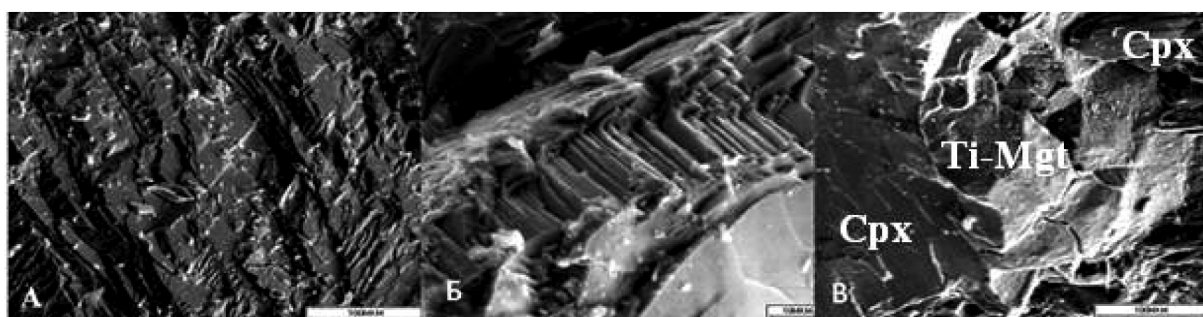
Минерал	Среднее содержание в пробе, %	Классы крупности, мм					
		–1+0,5	–0,5+0,315	–0,315+0,2	–0,2+0,074	–0,074+0,045	–0,045+0
Пироксен	67,1	56,5	65,7	66,5	74,3	71,5	63,0
Амфибол	4,1	8,8	9,3	7,9	–	7,3	3,6
Хлорит	3,8	3,8	3,6	2,5	2,7	5,3	6,1
Серпентин	4,5	1,3	5,7	4,6	5,4	6,0	6,1
Титаномагнетит	16,9	27,7	10,7	15,9	12,9	7,9	17,0
Ильменит	0,5	–	–	–	2,0	–	–
Оливин, шпинель	2,6	1,9	5,0	1,3	1,4	2,0	4,2
Плагноклаз	0,5	–	–	1,3	1,3	–	–

Приведенные данные ОГА (рис. 7–8) четко увязываются с морфоструктурными характеристиками титаномагнетита минералов и клинопироксенов (РЭМ): на рисунке 7 показаны взаимоотношения по-разному ориентированных кристаллов клинопироксенов в агрегате (А, Б) с диагеновой отдельностью в контакте сростаний с ксеноморфными кристаллами титаномагнетита (В). Здесь приведены для них средние значения микротвер-

дости. Также на рисунке 8 (по шлифам) отражены взаимоотношения рудного и нерудных минералов с учетом изменчивости их гранулярного состава выделений при формировании сидеронитовой структуры титаномагнетита. При этом следует особо подчеркнуть, что для структурного анализа продуктов обогащения очень важно иметь информацию о морфоструктурных характеристиках минералов как в объемном, так и плоскостном

вариантах. Это поможет минералогу совместно с технологом дать оценку особенностям раскрытия рудных и нерудных минералов руд при измельчении. Характеристика гранулярного состава титаномагнетита (рис. 7) отражена в гистограммах гранулометрии зерен по 3-м основным типам структур руд, на основании анализа которых начальная крупность измельчения определена величиной в 1 мм (табл. 1.) Дополнительные сведения к ОГА показаны в таблицах рис. 7 для 2-х генераций титаномагнетита: средний размер зерен титаномагнетита изменяется в пределах 0,163–0,284 мм; при этом степень изрезанности их уменьшается с 0,64 до 0,61, а удлинения – с 0,91 до 1,70, отражая процесс перекристаллизации и совершенствования морфологии выделений. В то же

время средний размер зерен клинопироксена изменяется в пределах 0,68–1,2 мм. Для оценки раскрытия важно определять микротвердость в сростаниях контактирующих зерен рудного и нерудного минералов различных ассоциаций. Из данных рис. 7 видно; различия между самыми низкими и высокими значениями микротвердости для обоих минералов составляют 266 и 131 кгс/мм²; в то же время разница у клинопироксенов в 2 раза выше и абсолютная величина микротвердости их также выше, что важно иметь в виду при измельчении руд. Несмотря на то, что титаномагнетиты в целом более пластичны, часть клинопироксенов за счет спайности, отдельности и микроблочности имеет пониженную микротвердость (Кч.-1), и они легче разрушаются (см. показатели раскрытия).



Данные оптико-геометрического анализа

Микротвердость сосуществующих минералов

Минерал	Содержание, %	Изрезанность	Размерность, мм			Удлинение	Обр.	титаномагнетит	клинопироксен
			мин.	средн.	макс.				
Титаномагнетит-1	8,2 (5,4-13,9)	0,64	0,014	0,163	2,00	1,91	Кч-1	593	774
Минерал	Содержание, %	Изрезанность	Размерность, мм			Удлинение	Обр.	титаномагнетит	клинопироксен
			мин.	средн.	макс.				
Титаномагнетит-2	5,9 (3,1-8,7)	0,61	0,014	0,284	2,00	1,70	Кч-3	724	1040
							Кч-4	695	920
							Кч-5	716	922

Средний размер зерен клинопироксенов в ассоциациях изменяется от 0,68 до 1,2 мм.

Рис. 7. Проявление диаляговой отдельности в агрегате по-разному ориентированных кристаллов клинопироксена (А, Б) в контакте сростаний с ксеноморфными кристаллами титаномагнетита (В), образующими сидеронитовую структуру (РЭМ, аналитик Д. О. Ожогин)

При перекристаллизации зерна клинопироксенов уплотняются, микротвердость повышается (при измельчении в более крупные классы выделяются плотные зерна). Очень важно проводить изучение состава титаномагнетитов проводить методами МРСА и ЯГРС. Средний состав титаномагнетита пробы (МРСА) характеризуется содержаниями элементов: Fe = 66,0; Ti = 1,81; (TiO₂ = 3,01); V = 0,45; (V₂O₅ = 0,80); Mn = 0,24; Cr = 0,12. Значения коэффициентов титанистости и ванадистости соответственно равны: K_т = 4,56 и K_в = 1,20. По параметрам ЯГРС – это типичный низкотитанистый титаномагнетит (аналитик Коровушкин В. В.). Изоморфизм Fe (по монофракциям) обусловлен

соответственно приведенными элементами его геохимической группы и подтвержден определением значений точки Кюри (Q = 556,1 – 556,4° С), а у собственно магнетита она равна 475° С.

Особенности раскрытия минералов более детально характеризуются данными, приведенными табл. 3 и на рис. 9–10. Анализ этих материалов показывает, что:

– визуализация минералогических особенностей ОМЧ рудных и нерудных минералов по классам крупности позволяет увидеть, как реально происходит раскрытие минералов с учетом изменения их состава, размеров и морфологии. Обращает на себя внимание, что лучше раскрывает-

ся нерудная фаза, чем рудная. Причем, начиная с крупности $-0,2+0,1$ мм резко переизмельчается нерудная фаза и это будет осложнять процесс сепарации. В то же время заметно уже с этого класса крупности образование флоккул из рудных частиц с захватом нерудной фазы в виде раскрытых частиц и бедных сростков. Данные по классу $-0,45+0$ мм не показаны из-за значительной флокуляции в нем рудных и нерудных частиц, что требует изучения их в специальных препаратах;

– оценивая особенности раскрытия минералов, необходимо использовать понятие о долях рудной и нерудной фаз в сростках частиц, т. к. при измельчении руд, начиная с размеров меньше природных зерен, минералы могут претерпевать порой существенные изменения с образованием новых фаз, вплоть до перехода их в аморфное состояние. В изучаемых пробах это связано прежде всего с преобразованием рудного минерала в морфотропном ряду изменений симметрии и состава: **титаномагнетит – магнетит – маггемит (Ti-маггемит) – гематит**, что потенциально заложено генетической природой основного рудного минерала. МРСА четко выявляет блоковое строение титаномагнетита с тонкими продуктами распада твердого раствора – ульвошпинель,

ильменит, плеонаст, маггемит. Заметно порой значимое изменение содержаний Ti и других элементов группы железа в отдельных блоках, вплоть до образования блоков собственно магнетита. ЯГРС, рентгенофазовый анализ и рентгеновская микротомография позволяют фиксировать изменения фазового состава ОМЧ. Особенно четко это проявляется в тонких классах крупности и подтверждается изменением коэффициентов титанистости и ванадистости по сравнению со средним содержанием в минерале в сторону их снижения. Об этом же говорят существенные различия в количестве свободной рудной фазы и распределении ее доли в сростках (табл. 3) по мере изменения классов крупности. Здесь же дана краткая характеристика минерального состава фракций;

– особенности раскрытия минералов в руде следует отражать, кроме табличного варианта, на графике (рис. 10). Здесь четко просматривается опережающий характер степени раскрытия нерудной фазы по сравнению с рудной до класса крупностью $-0,2+0,071$ мм. Затем практически обе кривые сближаются. Очень важно при этом с учетом выхода каждого класса крупности рассчитать средние значения степени раскрытия рудных и нерудных фаз.

Среднекрупный		
Кл. крупности, мм	титано-магнетит	Сумма классов
- 2 + 1	22,23	
- 1 + 0,5	35,18	57,41
- 0,5 + 0,25	32,02	
- 0,25 + 0,125	9,68	41,7
- 0,125 + 0,074	0,62	
- 0,074 + 0,044	0,21	0,89
- 0,044 + 0	0,06	

Мелкокрупный		
Кл. крупности, мм	титано-магнетит	Сумма классов
- 2 + 1	0,00	
- 1 + 0,5	34,16	34,16
- 0,5 + 0,25	43,72	
- 0,25 + 0,125	18,20	61,92
- 0,125 + 0,074	2,80	
- 0,074 + 0,044	0,97	3,93
- 0,044 + 0	0,16	

Дисперснокрупный		
Кл. крупности, мм	Титано-магнетит	Сумма классов
- 2 + 1	0,00	11,72
- 1 + 0,5	11,72	
- 0,5 + 0,25	45,72	
- 0,25 + 0,125	33,16	78,88
- 0,125 + 0,074	7,03	
- 0,074 + 0,044	1,94	8,87
- 0,044 + 0	0,42	

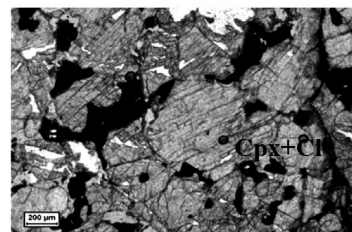
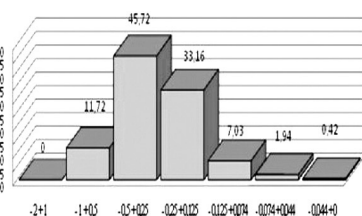
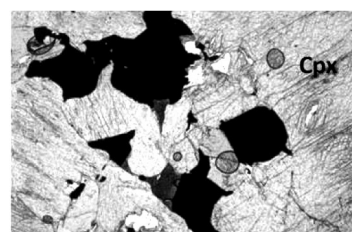
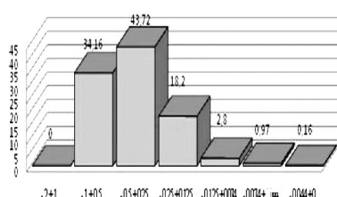
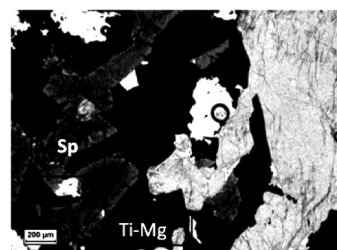
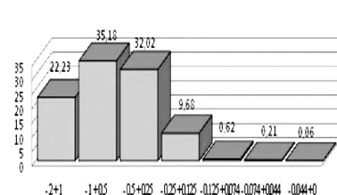
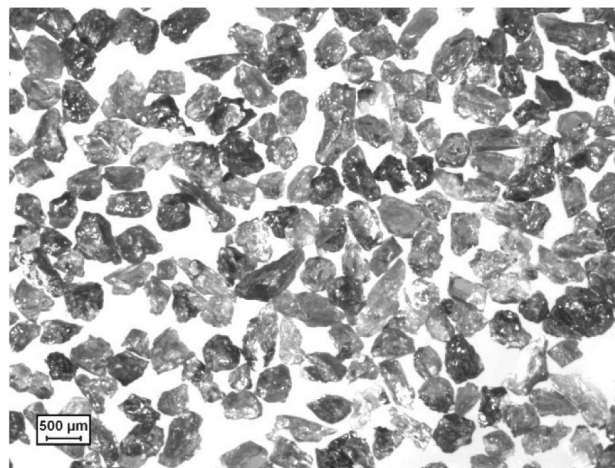
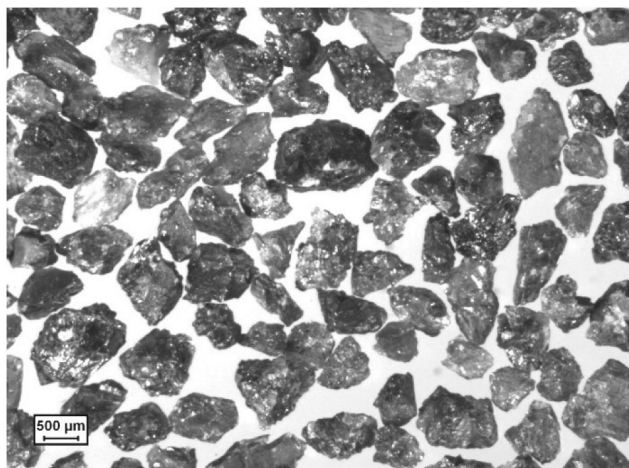
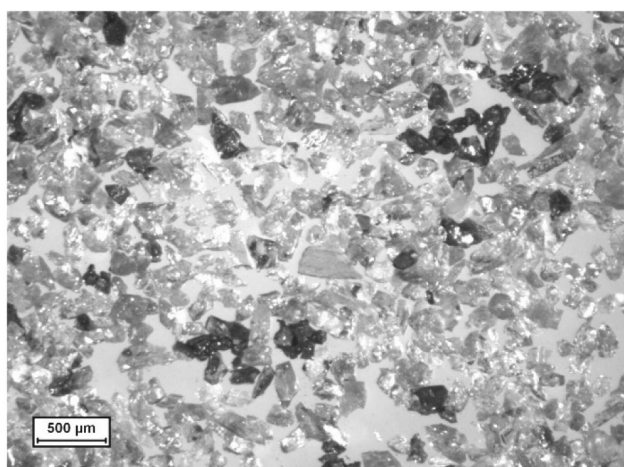
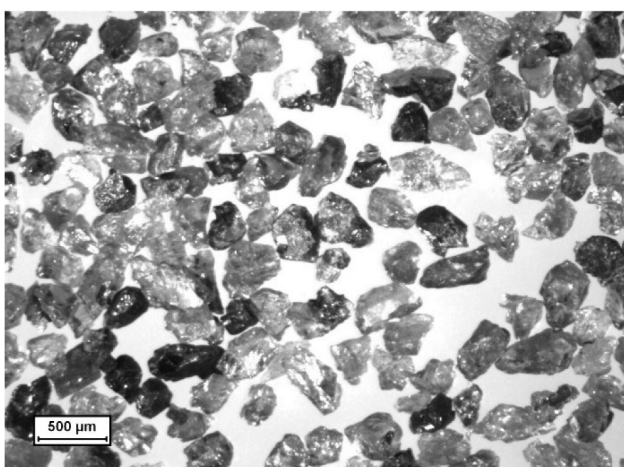


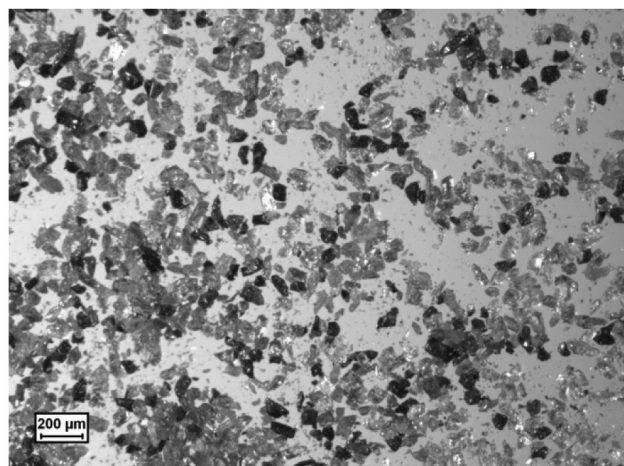
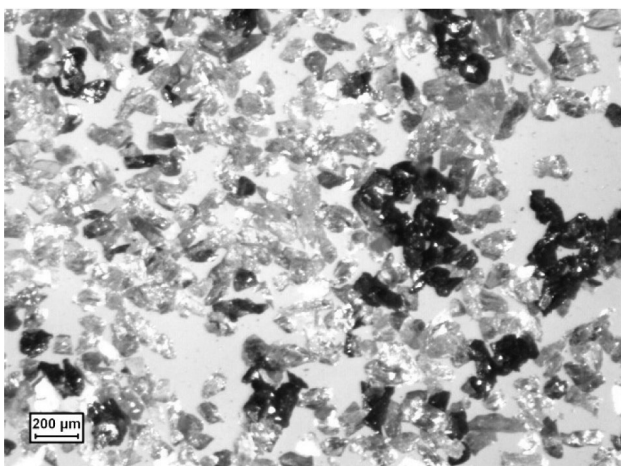
Рис. 8. Результаты определения массового гранулярного состава титаномагнетитов (отн. %) и гистограммы его распределения по классам крупности – крупно-среднекрупный, тонко-дисперснокрупный, разновидностей пробы титаномагнетитовых руд Собственно Качканарского месторождения. Аналитик Кривошеков Н. Н.



$-1 + 0,5 - 0,5 + 0,315$



$-0,315 + 0,2 - 0,2 + 0,1$



$-0,1 + 0,071 - 0,071 + 0,045$

Рис. 9. Морфолого-структурные особенности распределения свободных зерен (частиц) и сростков по классам крупности

Именно учет всех перечисленных особенностей исследования структурного анализа измельченной руды вместе с общими данными о вещественном составе руды Собствен-

но Качканарского месторождения позволило дать ее МТО.

Интересные данные были получены Ван-дер А. С. и Стукловой [24] при проведении

структурного анализа дробленных сульфидных руд Маднеульского месторождения. Ими было выявлено с использованием прецизионного метода растровой электронной оже-спектроскопии образование на поверхности зерен пирита (а иногда и халькопирита) в связи с раскрытием природных первичных сростков с вторичными минералами меди состава $Cu_{2-p}S$ в виде практически сплошных пленок (толщиной до 5 нм) вторичных медных минералов. Именно это и явилось основной причиной резкого снижения степени извлечения меди и ухудшения качества флотационного концентрата.

Нами [6] при исследовании продуктов флотационного и обжиг-магнитного методов обогащения окисленных гетит-мартитовых разновидностей железистых кварцитов было выявлено

образование цементационных пленок гетита на кварце, восстанавливающихся до магнетита. В процессе измельчения при этом образовывались ОМЧ бедных сростков -кварц с пленками гетита и магнетита. При обогащении такие сростки попадали во флотационные и магнитные концентраты, резко снижая их качество и в целом извлечение железа. Рассмотренные примеры свидетельствуют о том, что поверхность индивидов в сростаниях следует рассматривать как место, где происходят не только химические процессы (окисление-восстановление, сорбция-десорбция, ионные обмены), но практически непрерывно идет минералообразование (в том числе, в технологических операциях) микро-нанометрового диапазона размерности индивидов.

Таблица 3

**Характер раскрытия рудных и нерудных минералов
в классах крупности пробы исходной руды крупностью –1 мм**

Класс крупности, мм	Выход класса, %	Доля рудной фазы в сростках, %								Кр	Кнр	Минеральный состав фракции	
		Свободные 96–100	Богатые 71–95		Рядовые 31–70		Бедные 6–30		Безрудные 0–5				
			р	н/р	р	н/р	р	н/р	р				н/р
–1 + 0,5	26,62	6,6	7,2		43,3		30,9		12,3	13,4	24,3	Преобладают во всех фракциях пироксены и амфиболы, немного оливина, вторичные минералы – хлорит, серпентин, встречаются плагиоклазы и томпонсит. Из рудных минералов преобладают Ti-V-магнетит и собственно магнетит, немного ильменита, гематита, сульфидов, единичные проявления благородных металлов (платиноиды и золото). Заметны различия в распределении по классам пироксенов, амфиболов и оливина. Как правило, оливин и амфиболы тяготеют к более крупным классам, а пироксен в значительном количестве присутствуют, как в мелких так и тонких классах.	
			6,4		0,8		28,5		14,5	7,8	23,1		
–0,5 + 0,315	15,29	13,1	8,9		15,3		18,8		43,9	35,8	69,2		
			7,8		1,2		10,1		5,2	4,7	14,1		
–0,315 + 0,2	10,57	24,3	10,0		4,8		14,8		46,1	60,9	75,7		
			8,8		1,2		3,2		1,6	3,6	11,2		
–0,2 + 0,071	25,42	33,6	2,3		3,6		5,2		55,5	86,4	90,7		
			2,1		0,2		2,0		1,6	1,2	4,0		
–0,071 + 0,045	7,61	38,9	5,0		–		–		56,1	96,5	98,2		
			4		1								
–0,045 + 0	15,49	17					83		100	100			
Среднее по пробе	100								60,3	71,1			

Как справедливо подчеркивал В. И. Ревнивцев [25], практика обогащения руд различных генетических типов свидетельствует о том, что «информация о свойствах минерала, основанная на кристаллохимических параметрах его идеализированной структуры, недостаточна для описания поведения реальных кристаллов в процессах обогащения. Только учет генезиса кристалла, всей эволюции его образования и характера возникающих в ходе этой эволюции несовершенств (дефектов) его структуры может дать объективные представ-

ления о его реальных технологических свойствах. Именно различием генезиса может быть объяснен тот факт, что одни и те же минералы из разных месторождений или разных участков одного и того же месторождения ведут себя при обогащении по-разному». Несомненно, эти положения четко отражаются в основных понятиях современной ТМ, рассматривающей закономерности формирования сростаний минералов в связи с генетической природой их в ЕГТС (система «минерал – среда»).

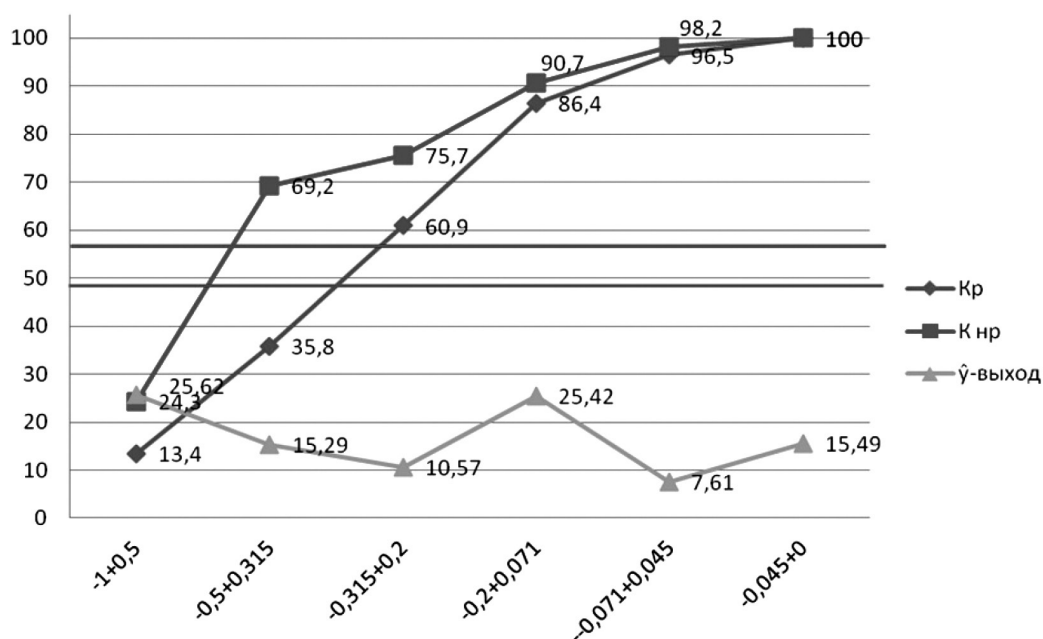


Рис. 10. Особенности раскрытия минералов руды, измельченной до крупности 1 мм

Система рудоподготовки предопределяет дезинтеграцию руд, сепарацию минералов с учетом степени контрастности их свойств. Ревнивцев И. И. и др. [26] показали, что кратковременное механическое воздействие (удар), мощное лазерное облучение приводят к возникновению новых полиморфных модификаций. Разные воздействия (кроме Т0 С) искажают кристаллическую решетку и, как правило, понижают симметрию новой модификации. При тепловых воздействиях происходит релаксация уровня дефектоемкости (отжиг дефектов) с повышением симметрии кристалла. Однако, при разрушении кристаллов «в активной фазе ОМЧ также происходит релаксация дефектоемкости, дрейф объемных дефектов на поверхность и аннигиляция поверхностных за счет реакции активных поверхностных центров с компонентами внешней среды».

При раскалывании минералов прослеживаются значительные энергетические изменения на фронте излома. По данным Х. Румпфа (1961[6]) при больших скоростях разрушения в субмикроскопических зонах протяженностью до 1 нм возникают температуры, намного превышающие Тпл вещества; поверхность излома, разрыхлен-

ная на разную глубину (до 1 нм), находится в квазиаморфном состоянии. В различных минералах и типах их природных сростаний при измельчении индицирование механической энергии в тепловую происходит по-разному и зависит как от структурных дефектов, так и от направления фронта излома. Часть энергии идет на образование структурных дефектов, а часть – на увеличение их плотности. Наибольшая тепловая энергия там, где плотность дефектов минимальна, что и предопределяет раскрытие. Следует учитывать избирательность измельчения минералов в сростаниях (особенно в «ложных» типах сростаний).

Углубленное изучение особенностей вещественного состава руд с привлечением комплекса современных минералого-аналитических и физико-химических методов анализа, творческое использование достижений и новых знаний в области кристаллохимии, кристаллофизики, минералогии и технологического эксперимента по веществу в широком понимании позволяют обсуждать проблему природы формирования сростаний минералов, в значительной степени определяющих технологические свойства минералов и руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крейг Дж., Воган Д. Рудная микроскопия и рудная петрография. М.: Мир, 1983. 423 с.
2. Григорьев Д. П. Позиции онтогении минералов // ЗВМО. 1978. Ч. 107. Вып. 4. С. 407–415.
3. Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогения минералов. М., 1975, 340 с.
4. Пирогов Б. И. Онтогенический метод в познании технологических свойств минералов. Сб.

Проблемы онтогении минералов. Л.: Наука, 1985, с. 22–30.

5. Ревнивцев В. И., Гапонов Г. В., Зарогатский Л. П. и др. Селективное разрушение минералов. М.; Недра, 1988. 286 с.

6. Пирогов Б. И., Порохов Г. С., Холошин И. В., Тарасенко В. Н. Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988, 304 с.

7. Юсупов Т. С., Кириллова Е. А., Седелникова. Пути повышения извлечения ценных компонентов руд на основе управления селективностью измельчения. // Пластинские чтения. Иркутск: 2004. С. 59–60.

8. Пирогов Б. И. Роль минералогических исследований в обогащении руд. // Минерал. журнал. 1982, № 1. С. 81–92.

9. Пирогов Б. И. Типы сростаний минералов в бедных железных рудах Кривого Рога в связи с их обогатимостью. М.: Недра. // Сб. науч. Тр. ин-та Механообермет «Обогащение и окискование железных руд», в. 8, 1967, с. 6–20.

10. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: И. Л., 1962, 1132 с.

5. Кэмерон Ю. Н. Рудная микроскопия (современные методы исследования рудных минералов под микроскопом). М.: Мир, 1966, 308 с.

12. Джонс М. П. Прикладная минералогия. Количественный подход. М.: Недра, 1991, 391 с.

13. Попов В. А. Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург : УрО РАН, 2011. 167 с.

14. Жабин А. Г. Онтогения минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979. 276 с.

15. Рукасова Е. Н., Пирогов Б. И. Особенности обогащения магнетитовых роговиков ЦГОКА при различных методах измельчения // Обогащение полезных ископаемых. Киев: Техника, 1967. Вып. 2. С. 27–33.

16. Силаев В. И., Хазов А. Ф., Пискунова Н. Н. Оценка минеральных месторождений: химия, геохимия или минералогия. // Минералогическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов: сб. статей по матер. V Рос. семинара по технологиче-

ской минералогии. Петрозаводск: изд. КарНЦ РАН, 2011. С. 35–47.

17. Пирогов Б. И. Геолого-минералогические факторы, определяющие обогатимость железистых кварцитов. М.: Недра, 1969, 240 с.

18. Пирогов Б. И., Мананга Ж. Особенности сростаний минералов в железистых кварцитах докембрия и их роль в обогащении. // ДАН УССР. Сер. Б. 1983. № 10. С. 3–7.

19. Пирогов Б. И., Холошин И. В. Инфракрасные спектры поглощения магнетита и их прикладное значение. // Минерал. журн. 1989, № . С. 73–80.

20. Чесноков Б. В. Относительный возраст минеральных индивидов и агрегатов. М.: Недра, 1974. 105 с.

21. Петровская Н. В. Признаки неоднородности минералов и их генетическое значение. // ЗВМО, 1977, ч. 106, в. 1. С. 34–44.

22. Урусов В. С. Теория изоморфной смесимости. М.: Наука, 1977. 272 с.

23. Пирогов Б. И., Броницкая Е. С., Астахова Ю. М., Волков Е. С. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость // Разведка и охрана недр. 2013, № 2. С. 47–51.

24. Вандер А. С., Стуклова С. Б. Применение электронной оже-спектроскопии для анализа медьсодержащих сульфидных руд и продуктов их обогащения. // ЗВМО. 1994. Ч. СХХIII, № 3. С. 112–116.

25. Ревнивцев В. И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых. // ЗВМО. 1982, вып. 4. С. 4–20.

26. Ревнивцев В. И., Доливо-Добровольская Г. И., Владимиров П. С. Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб.: Наука, 1993. 248 с.

27. Григорьев Д. П. Соотношение технологической минералогии с сопредельными отраслями знания. // Сб. Онтогения минералов и технологическая минералогия. Киев.: Наукова думка, 1988. С. 11–15.

УРОВНИ КОНЦЕНТРАЦИИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ИСТОЧНИКАХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ РОЛЬ В ОЦЕНКЕ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЫРЬЯ

Мелентьев Г. Б.

ОИВТ РАН, г. Москва

В «золотой» век развития за рубежом производства и потребления редкоземельных металлов (РЗМ) Россия, в отличие от бывшего СССР

и зарубежных стран, оказалась лишенной собственных крупных и устойчивых производств как минеральных концентратов, так и конечной

редкоземельной металлопродукции. Исключением являются Ловозерский ГОК в Кольском регионе и Соликамский магниевый завод (СМЗ) на Урале, которые продолжают в значительно сократившихся объемах выпуск, соответственно, лопаритовой (Ta, Nb, TR, Ti) и редкоземельной продукции (плава хлоридов и карбоната).

Однако, современные производства и потребление РЗМ ориентированы на выпуск индивидуальных металлов или их групп согласно общепринятой классификации (табл. 1). Поэтому нынешнее ловозерско-соликамское производство редких земель не соответствует требованиям высокотехнологичных промышленных потребителей «Росатома», «Ростехнологии» и др.: во-первых, в связи с преимущественно цериево-лантановой специализацией исходного лопаритового сырья и, во-вторых, в связи с отсутствием в настоящее время у СМЗ технологических возможностей выпуска индивидуальной конечной продукции, представленной редкими и редкоземельными металлами. Как известно, эти возможности утрачены с распадом СССР, т. к. химико-металлургические предприятия – Иртышский и Ульбинский ХМЗ (Восточный Казахстан), выпускавшие конечную ниобиевую, танталовую и индивидуализированную редкоземельную продукцию оказались на территории суверенного Казахстана и в сфере деятельности иностранного капитала.

Подобным же образом утрачены возможности выпуска иттриево-земельной и собственно иттриевой продукции на бывшем Актюзском ГМК (Киргизия) и Прикаспийском ГМК (Западный Казахстан).

Редкоземельные металлы как инновационный ресурс: зарубежные реалии и российские перспективы

В сложившейся ситуации удовлетворение потребностей российского оборонно-промышленного комплекса (ОПК) и других высокотехнологичных отраслей промышленного производства в РЗМ преимущественно осуществляется за счет импорта необходимой редкоземельной продукции и готовых изделий. Как Россия, обладающая собственной минерально-сырьевой базой РЗМ (2-е место после Китая), так и Япония, не имеющая собственных источников РЗМ, но традиционно специализированная на производствах высокотехнологичной продукции с их использованием, до недавнего времени пользовались практически неограниченными экспорт-

ными возможностями Китая – ведущей страны в современном мире по запасам редкоземельного сырья и выпуску минеральных концентратов и конечной металлопродукции РЗМ. В течение 20 лет Китай монополизировал мировое производство и рынок РЗМ, а затем сосредоточился на их использовании в собственных высокотехнологичных производствах, резко сократив свой экспорт и, тем самым, обусловив рост цен на редкоземельное сырье и продукцию. В этих условиях наша страна вынуждена фактически заново воссоздавать всю технологическую последовательность редкоземельных производств – от добычи и обогащения исходного сырья до химико-металлургических переделов, выпуска индивидуальных редкоземельных металлов и готовых изделий, причем в условиях внешней конкурентной среды и отсутствия внутреннего рынка.

При этом следует иметь в виду, что стратегически важная проблема возрождения и развития российской редкоземельной продукции на инновационно-технологической основе представляется достаточно сложной, затратной и длительной по срокам реализации. Это обусловлено существенными отличиями отечественной минерально-сырьевой базы (МСБ) редких земель от эксплуатируемых и разведываемых зарубежных месторождений, необходимостью разработки современных обогачительно-перерабатывающих схем переработки высококомплексного сырья (в отличие от зарубежного собственно редкоземельного и мономинерального) для каждого из объектов горнопромышленного освоения и, наконец, создания интегрированных редкометалльно-редкоземельных производств (кластеров), обеспечивающих максимальную экономическую эффективность и экологическую безопасность [1]. Неслучайно за 20 лет «переходного периода» решение этой проблемы, несмотря на опережающие исследования, разработки и рекомендации научных специалистов, не получило должной поддержки и развития со стороны крупного бизнеса и государства, а результаты редкоземельных конференций 2011 г. (ОАО «ФосАгро» и «Росатом») и 2012 г. («Росатом») пока остаются нерешенными в конкретные планы действий и, тем более, в оптимизацию остаточных производственных мощностей РЗМ и создание новых.

За рубежом основными промышленными источниками РЗМ служат 4 типа минеральных концентратов: бастнезитовые (60,70 и 85 % оксидов РЗМ), монацитовые (55–60 %), ксенотимовые

(от 25 % Y_2O_3) и концентрированные растворы из сорбционно-ионных руд (90 %) – табл. 1. В последнем десятилетии мировым лидером по запасам и производству РЗМ стал Китай (бастнезит и «ионные» руды), на втором месте – США (бастнезит) и на третьем – Индия и Австралия (монацит и ксенотим из россыпей); далее следуют Канада, ЮАР, Бразилия и некоторые другие. Примечательно, что Япония как ведущий производитель высокотехнологичной продукции с использованием редких земель удовлетворяет свои потребности в них исключительно за счет импорта и вторичного сырья.

Таблица 1

Основные промышленно-ценные минералы-концентраты РЗМ

Минералы, руды	Доля в сумме РЗМ, %			TR _{Ce} /TR _Y
	TR _{Ce}	TR _Y		
	Ln _{Ce}	Ln _Y	Y	
ЦЕРИЕВОЗЕМЕЛЬНЫЕ TR _{Ce} : TR _Y >20				
Бастнезит	98–99	1–2	<1	40–90
Лопарит	98	2	<1	42–46
ИТТРИЕВО-ЦЕРИЕВОЗЕМЕЛЬНЫЕ TR _{Ce} : TR _Y = 5–20				
Монацит	83–92	5–13	2–3	5–12
Апатит	89–92	5–6	3–5	8–11
ИТТРИЕВОЗЕМЕЛЬНЫЕ TR _{Ce} : TR _Y <5				
Ксенотим	7–9	30–34	59–61	0,1
Гагаринит	22	33	45	0,3
Иттрофлюорит	25	29	46	0,3
«Ионные» руды	9–75	15–28	10–63	0,1–3
Эвдиалит	59	20	21	1,4

Согласно существующей классификации (табл. 2) в зарубежном мире преобладают добыча и использование легких лантан-цериевых РЗМ, в то время как источники средне-тяжелых иттриевых лантаноидов и особенно иттрия распространены меньше и служат объектами интенсивных поисков и разведки в целях ликвидации дисбаланса между их производством и возрастающими потребностями инновационных отраслей промышленности. Пока наибольшим спросом пользуются цериевые лантаноиды, в частности, церий и неодим, а также иттрий; из иттриевых лантаноидов – Sm, Eu, Tb, Dy. В традиционных областях применения (металлургия, стекло и керамика и др.) прогнозируются не высокие темпы ежегодного роста потребления РЗМ ($\leq 2–4\%$), в то время как для производств редкоземельных магнитов,

никель-гибридных батарей, автокатализаторов и другой инновационной продукции темпы роста потребления могут составлять $\geq 10–15\%$.

Таблица 2

Природно- и промышленно специализированная группировка редкоземельных металлов

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ (РЗМ)														
TR = Ln + Y														
цериевая группа TR _{Ce}				иттриевая группа TR _Y										
Лантаноиды – Ln														
цериевые – Ln _{Ce}				иттриевые – Ln _Y										
– Ln _{Ce}				средние – Ln _{Sm}						тяжелые – Ln _{Er}				
La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
Лантан	Церий	Празеодим	Неодим	Самарий	Европий	Гадолиний	Тербий	Диспрозий	Гольмий	Эрбий	Тулий	Иттербий	Лютеций	Иттрий

Увеличение производства и потребления индивидуальных РЗМ в последние 10–15 лет обусловлено их использованием в инновационных производствах автокатализаторов (Ce, La), постоянных магнитов (Sm, Nd, Tb и др.), никель-гидридных батарей (La-мишметалл), люминофоров, цветных телевизоров, люминесцентных ламп (Y, Eu, Tb), волоконнооптических систем связи (La, Er), оптоэлектроники (Tb, Dy, Er и др.), лазеров и т. д. [1]. Металлические Y, La, Nd используются для легирования легких алюминиевых, магниевых, железных и других сплавов, применяемых в аэрокосмической технике (АРКТ), Gd, Eu, Er – в атомной технике, Y – в сверхпроводящей технической керамике, в том числе – для новых топливных элементов на ТЭС, в автомобилях и др. В связи с разработками в области водородной энергетики в качестве перспективных сплавов для аккумулирования и хранения водорода начали использоваться сплавы $LaNiMg$, способные поглощать в 400 раз больше водородного газа относительно своего объема.

Мировое потребление индивидуальных редких земель ориентировочно оценивается Т. Ю. Усовой (ИМГРЭ, 2008) в следующих объемах (в тоннах оксидов): La – 2000–3500, Ce – 4000–5000, Nd – 8000–10000, Sm – 1000–15000, Eu – 300–400, Cd – 200–250, Tb – 300–400, Dy – 500–1000, Y – 3000–4000.

Различия в достигнутых уровнях производства и потребления РЗМ в соответствии с изменяющейся конъюнктурой мирового рынка отражены в их стоимости (табл. 3).

Таблица 3

Стоимость редкоземельных продуктов и скандия высокой чистоты (долл/кг) на 31.12.2012 г.
(по материалам агентства mineralprices)

Виды РЗМ	Металлы	Стоимость	
		Металлы	Оксиды
1	Лантан	28	13
	Церий	25	12
	Празеодим	120	95
	Неодим	115	77
2	Самарий	55	–
	Европий	–	2150
	Гадолиний	210	75
	Тербий	2500	1750
	Диспрозий	1100	975
	Эрбий	275	77
3	Иттрий	120	50
4	Скандий	15000	7200
5	Мишметалл	17	29

В перспективе на 2020 г. и далее в мире прогнозируется масштабное увеличение потребностей в Ce, Nd, Tb, Dy, Y, а также, возможно, в La, Pr, Sm, Eu, Gd, Er. В частности, уже сейчас Китай ежегодно производит до 30 т Tb, который в возрастающих объемах используется в постоянных магнитах, магнитооптических материалах и DVD-дисках. Кроме того, дефицит в производстве и потреблении прогнозируется для диспрозия и иттрия, хотя последний пока производится в избытке и складировается. Традиционно иттрий используется в производствах люминофоров: в США – до 84 %. В Японии на протяжении 2000–х годов наблюдалось значительное превышение объемов импорта оксидов иттрия над их потреблением – в 2,5 раза [4]. Ожидаемый рост потребления иттрия обусловлен развитием производств высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) многоцелевого назначения и использованием в качестве легирующих компонентов в сталях и сплавах. Пока в Японии производятся тонкопленочные сверхпроводящие изделия, хотя разрабатываются и объемные компоненты топливных элементов и автомобильных двигателей из циркониевой керамики, стабилизированной иттрием. В этих целях еще в 90–х годах был организован экспорт концентрата бадделеита – природного диоксида циркония с Ковдорского ГОКа на специально построенный завод в Норвегии, где из него производилась специальная керамика, а позднее тем же российским предприя-

тием – и в Японию. В США разработаны топливные элементы на базе иттрий-циркониевой керамики, которые повышают КПД тепловых ТЭС с 35 до 60 %, а также сверхпроводящие кабели [5].

В настоящее время, очевидно, что коренное отличие российской редкоземельной МСБ от крупнейших зарубежных источников заключается в отсутствии на нашей территории как эксплуатируемых, так и разведанных месторождений собственно редкоземельного сырья. Крупными и стабильными источниками цериево-лантановых РЗМ как попутных компонентов служат либо эксплуатируемые высококомплексные редкоземельно-глиноземно-редкометалльные руды Ловозера, либо могут служить эксплуатируемые редкометалльно-редкоземельно-фосфатные руды соседних Хибин, либо в перспективе – разведанное железорудно-алюмофосфатно-редкометалльно-редкоземельное сырье супергигантского и наиболее богатого иттрием и скандием месторождения Томтор на СЗ Саха-Якутии [2, 3]. К числу объектов рекомендуемого ускоренного промышленного освоения относятся [1]:

1. иттриевоземельные, легкодоступные месторождения в районах Хибин, Ловозера и Кейв в Кольском регионе и Кемеровской области.

2. техногенные ресурсы, представленные фосфогипсом – объемным отходом сернокислотной переработки хибинского апатита на фосфатные минеральные удобрения на заводах корпорации «ФосАгро» в Северо-Западном, Центральном, Поволжском и Уральском ФО.

3. техногенные месторождения монацита – в виде товарного радиоактивного концентрата, складированного на Урале, и слаборадиоактивного куларита, содержащегося в отходах эксплуатации золоторудной россыпи в Усть-Янском районе Саха-Якутии.

Сравнительный геолого-экономический анализ этих природных и техногенных источников РЗМ в целях составления сбалансированной на ближайшие годы и десятилетие государственной Программы и плана действий по их освоению и использованию должен включать информацию об их запасах и ресурсах, горнотехнических условиях эксплуатации, комплексности и обогатимости руд, степени извлечения суммы РЗМ и индивидуальных компонентов из руд и концентратов, эффективности и экологичности традиционных технологий их извлечения, потребительском спросе и уровнях цен на внутреннем и внешнем рынках.

Результаты такого анализа позволят определить очередность и сроки освоения вышеуказанных и, возможно, других источников РЗМ, например, выявленных и разведанных в труднодоступных южных районах Восточной Сибири, а также оценить соответствующие риски.

В числе последних обращает на себя внимание радиационный фактор, который применительно к редкометалльно-редкоземельным рудам и минеральным концентратам в советское время замалчивался в связи с закрытым характером этой информации, а в течение 20-летнего «переходного» периода в новой России оставался малоизученным из-за фактического прекращения исследований редкометалльного сырья. Поэтому в настоящей статье, преимущественно с использованием результатов собственных минералого-геохимических исследований, выполненных в 80-х – 90-х годах и проанализированных в 2000-х, приводятся данные об уровнях концентрации и распределении тория и урана в различных источниках редкометалльно-редкоземельного сырья в целях оценки их роли

в обеспечении радиационно-экологической безопасности рекомендуемых производств РЗМ.

Естественные радионуклиды в фосфатном сырье и отходы его переработки

В качестве приоритетных и стабильных источников РЗМ в нашей стране с прошлого века и по настоящее время рассматривается природное фосфатное сырье – апатитовые концентраты Хибинских месторождений высококомплексных редкометалльно-глиноземно-редкоземельно-фосфатных руд и техногенное, представленное фосфогипсом – складированным отходом сернокислотной переработки апатита на минеральные удобрения на заводах корпорации «ФосАгро». Эти виды сырья сравнительно с традиционно добываемым и перерабатываемым в России лопаритом характеризуются несколько меньшими содержаниями суммы РЗМ при сопоставимых содержаниях La, Ce, Pr, Nd и повышенных – Sm, Dy (в 2 раза), Eu (почти в 10 раз) и Er (в 20 раз), а также иттрия – до 280 г/т Y_2O_3 (табл. 4).

Таблица 4

Содержания индивидуальных редких земель в природных и техногенных видах сырья

Сырье (содержание РЗМ), %	Оксиды редкоземельных элементов, % от общего содержания в минералах														
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
Лопарит	25	53	6	14	0,9	0,08	0,6	0,4	0,12	0,08	0,02	–	–	–	–
Эвдиалит	12	29	4	14	4,2	0,95	2,5	0,9	3,4	0,9	2,0	0,3	1,9	0,43	23
Хибинский апатит	27	43	5	14	2,1	0,7	1,7	0,1	1,1	0,1	0,4	–	0,1	–	4,8
Фосфогипс из хибинского апатита	29	44	4	15	1,6	0,6	1,8	0,2	0,8	0,1	0,3	–	0,1	–	1,6
Природный концентрат Томтора	21	46	5	14	2,1	0,6	1,6	0,3	0,8	0,1	0,3	–	0,2	0,1	7,6

Преимущества апатита и фосфогипса сравнительно с лопаритом в содержаниях иттриево-земельных металлов дополняются несоизмеримо меньшими содержаниями в них радиоактивных элементов – тория и урана, которые не превышают ПДК, но могут накапливаться в продуктах и отходах обогащательных и перерабатывающих производств, оказывая негативное медико-экологическое воздействие на среду обитания и здоровье местного населения [6]. При этом принципиально важным является определение соотношений между ураном и торием, т. к. нормирование концентраций последнего в России в 3 раза жестче, чем урана.

В табл. 5 приводятся результаты изучения автором в 90-х годах в апатитах из вмещающих пород и рудных тел Хибинских месторождений

уровней концентрации урана и тория и их соотношений друг с другом. Мономинеральные фракции апатита были выделены из групповых проб, отобранных в горных выработках в разрезах по мощности вмещающих пород со стороны лежащего и висячего боков непосредственно в пределах апатито-нефелиновых рудных тел. Из этих же проб были выделены монофракции сфена как титаново-редкометалльного минерала – спутника профилирующего апатита и концентратора радиоактивных элементов. Определения содержания урана и тория были выполнены в ИМГРЭ Мингео СССР нейтронно-активационным методом в процессе выполнения автором договорной работы с ОАО «Апатит».

Результаты анализов апатита с рудников Юкспор, Расвумчорр и Восточный (карьеры Коашва,

Ньюорпах, Суолуайв), прежде всего, свидетельствуют о том, что содержания урана в них варьируют в пределах 15–16 г/т на западных рудниках и 2,2–4,0 г/т на Восточном, в то время как содержания тория, соответственно, от 15–31 г/т до 4,7–17 г/т при аномальном содержании 111г/т на Коашве. Таким образом, во-первых, в апатитах установлено стабильное и значительное преобладание тория над ураном и, во-вторых, во вмещающих породах и рудах Вос-

точного рудника это преобладание максимально благодаря значительно меньшим содержаниям в апатитах урана относительно его содержаний в западных рудниках ($< 3\text{--}6$ раз). Принимая за максимальное содержание в апатитах 16 г/т урана и 25 г/т тория в пробе апатито-нефелиновой руды с Расвумчорра получаем: $(16 \times 0,34 + 25 \times 0,11) \times 10^{-9} = (5,44 + 2,75) \times 10^{-9} = 8,19 \times 10^{-9} \text{ Ки/кг} < 10 \times 10^{-9} \text{ Ки/кг}$, что соответствует санитарно-гигиеническим нормам.

Таблица 5

Содержания (г/т) радиоактивных элементов (тория и урана) и их соотношения в мономинеральных фракциях апатита из вмещающих пород и руд Хибинских месторождений (нейтронно-активационный анализ)

№№ п/п	Объединенные пробы	Характеристика пород и руд	Th	U	Th/U
Юкспорский рудник					
1	МБ-289, 489, 689	Ййолит-уртиты лежащего бока	15,0	15,0	1
2	МБ-389, 789, 1089	Уртиты пегматоидные лежащего бока	20,0	15,0	1,333
3	МБ-1489, 1589	Малиньиты рудные лежащего бока	17,0	15,0	1,133
4	МБ-889, 989, 1189	Апатито-нефелиновая руда	31,0	15,0	2,067
5	МБ-1289, 1689	Нефелино-apatитовая руда	13,0	15,0	0,867
Расвумчоррский рудник					
6	МБ-190, 490, 590	Ййолит-уртиты лежащего бока	22,0	15,0	1,467
7	МБ-1090, 1190	Малиньиты рудные лежащего бока	21,0	15,0	1,4
8	МБ-290	Апатито-нефелиновая руда	25,0	16,0	1,563
9	МБ-990	Нефелино-apatитовая руда	17,0	16,0	1,063
10	МБ-390	Уртиты висящего бока	29,0	15,0	1,933
11	МБ-690, 790, 890	Рисчорриты висящего бока	26,0	16,0	1,625
Восточный рудник Карьер Коашва					
12	МБ-70191	Вмещающие ййолит-уртиты (СЗ фланг рудной залежи)	17,0	2,8	6,071
13	МБ-70291	Апатито-нефелиновая рудная залежь	10,0	2,2	4,545
14	МБ-70391	Вмещающие ййолиты, уртиты, рисчорриты (южный фланг рудной зоны)	111,0	3,8	29,211
Карьер Ньюоркпах					
15	МБ-70891	Вмещающие ййолиты, уртиты, рисчорриты (северный фланг рудной залежи)	12,0	3,4	3,529
16	МБ-70791	Апатито-нефелиновая рудная залежь	4,7	3,0	1,567
17	МБ-70991	Вмещающие ййолиты, уртиты, рисчорриты (южный фланг рудной зоны)	13,0	3,5	3,714
Карьер Суолуайв					
18	МБ-70591	Вмещающие уртиты, рисчорриты (северный фланг рудной залежи)	13,0	3,3	3,939
19	МБ-70491	Апатито-нефелиновая рудная залежь	13,0	3,7	3,514
20	МБ-70691	Вмещающие уртиты, ййолиты (южный фланг рудной залежи)	12,0	4,0	3,000

В сфеновых монофракциях содержания урана варьируют в пределах 10–53 г/т и тория – от 8,3 г/т до 14 г/т (табл. 6). Однако, в отличие от апатитов, содержания урана в сфенах из руд Восточ-

ного рудника сравнительно с западными значительно выше, причём в 2–5 раз. Содержания тория также выше, но в меньшей степени (в 1,5–2 раза). Радиоэкологическая оценка сфена с мак-

симальными содержаниями от 26 до 53 г/т урана при 10 г/т – 14 г/т тория через пересчет на удельную активность, свидетельствует о предельно допустимом уровне радиационной безопасности, а для аномально высоких содержаний – о превышении его почти в 2 раза. Следовательно, сфеновые концентраты из руд Восточного рудника, в отличие от западных, могут быть небезопасными с радиоэкологических позиций, особенно при пирохимических переделах и использовании в высоко-температурном литье.

В то же время следует иметь в виду, что сфен, подобно лопариту, представляет собой редкометалльно-титановое комплексное химическое сырье. Кроме содержаний титана (28,5–37,5 % TiO_2), в 2 раза превышающих его содержание в титаномагнетите, для сфена характерны высокие концентрации тантала (130–260 г/т), ниобия (2,1 кг/т), а также стронция и циркония (до 1,5 кг/т). При среднем содержании сфена в апатито-нефелиновых рудах 10–15 кг/т и уровнях его использования ОАО «Апатит» до 1 тыс. т/год не используемые сбросы титановых минералов в хвостохранилище приближаются к 200 тыс. т/год. Такое количество «отходов» минералов-концентраторов диоксида титана превышает его годовое производство в России, в то время как накопление в хвостах обогащения тантала со сфеном сопоставимо с его бывшим союзным производством [6, 7]. Как известно в свое время решение о промышленном освоении Ловозерского месторождения лопаритовых руд было принято в связи с возможностями и перспективами извлечения из лопарита в качестве главного промышленно-ценного компонента тантала и сопутствующих ему Nb, TR, Ti. С этих позиций представляется целесообразным оценить с химико-технологических и технико-экономических позиций перспективы глубокой и полной переработки сфена как одного из рудообразующих минералов хибинских месторождений, включая обогащенные ими зоны «сфени-тов» висячем боку эксплуатируемых месторождений и планируемого к отработке Партомчорра, с получением всего вышеуказанного ассортимента титаново-редкометалльной продукции. Немаловажным положительным фактором при этом является обнаружение нами устойчиво допустимых уровней концентрации в сфенах естественных радионуклидов во всех хибинских месторождениях (табл. 6).

Необходимо заметить, что аномально высокие содержания тория и урана в сфенах, приводимые

некоторыми исследователями, по-видимому, обусловлены присутствием в сростках с ним радиоактивного перовскита (до 1 кг/т Th и 300 г/т U), что характерно для глубоких горизонтов рудных залежей и восточных (тыловых) флангов продуктивной «Хибинской дуги».

В титаномагнетитах и ильменитах содержания урана и тория сопоставимы. На Юкспорском руднике в них содержится до 3–5 г/т урана и 1,5–4 г/т тория, в то время как на Расвумчорре содержания урана достигают 4–15 г/т и тория 1,6–8 г/т, т. е. в целом заметно выше. Соответствие их санитарно-гигиеническим нормам радиационной безопасности даже в случае планируемых пирометаллургических переделов сомнений не вызывает.

Согласно авторским количественно-минералогическим исследованиям собственно редкометалльно-титановые минералы-концентраторы тория и урана присутствуют во вмещающих породах и рудах Хибинских апатит-нефелиновых месторождений в виде мелкой вкрапленности, т. е. являются типично акцессорными и обнаруживаются в составе тяжелой фракции проб под микроскопом. Среди них установлены ринколит, лопарит, перовскит, ломоносовит-мурманит и другие. Акцессорные минералы-концентраторы радиоактивных компонентов в пределах Кировского рудника (Саамский карьер) встречаются редко, образуя скопления в пегматоидных шлирах, где в ризкорритах кровли количество лопарита достигает 0,5 кг/т, а перовскит накапливается до 200–376 г/т в апатит-нефелиновых рудах и в «сфенидах» со стороны висячего бока рудной залежи. Количество ринколита в рудах достигает 487 г/т.

На Юкспорском руднике лопарит встречается как в урритах лежащего бока (117–465 г/т), так и в ризкорритах висячего бока (251 г/т) рудной залежи. Здесь же, в рудах лежащего бока, содержания перовскита не превышают 1–4 г/т. Мурманит-ломоносовит распространен и в рудах и во вмещающих породах (250–350 г/т), а содержания ринколита достигают 100–200 г/т. На Расвумчоррском руднике в породах кровли содержится 132–955 г/т лопарита, в них же – 0,2–1,2 кг/т перовскита при содержаниях его в руде до 195 г/т, а также 0,5–1 кг/т ломоносовита-мурманита. На Восточном руднике в «переслаивающихся» вмещающих породах и рудах, ринколит, лопарит и перовскит распространены повсеместно, во всем объеме, в то время как ломоносовит-мурманит встречается реже, образуя визуально наблюдаемые

«музейные» выделения на вершине между Коашвой и Ньюорпахком. При этом, количество ринколита достигает 0,2–1 кг/т, лопарита – 54–453 г/т и перовскита – 11–31 г/т.

Таблица 6

Содержания (г/т) радиоактивных элементов (тория и урана) и их соотношения в мономинеральных фракциях сфена из вмещающих пород и руд Хибинских месторождений (нейтронно-активационный анализ)

№№ п/п	Объединенные пробы	Характеристика пород и руд	Th	U	Th/U
Юкспорский рудник					
1	МБ-289, 489, 689	Ййолит-уртиты лежащего бока	8,9	10,0	0,89
2	МБ-389, 789, 1089	Уртиты пегматоидные лежащего бока	8,3	10,0	0,83
3	МБ-1489, 1589	Малиньиты рудные лежащего бока	11,0	11,0	1
4	МБ-889, 989, 1189	Апатито-нефелиновая руда	14,0	10,0	1,4
Расвумчоррский рудник					
5	МБ-190, 490, 590	Ййолит-уртиты лежащего бока	11,0	10,0	1,1
6	МБ-1090, 1190	Малиньиты рудные лежащего бока	8,1	10,0	0,81
7	МБ-290	Апатито-нефелиновая руда	12,0	10,0	1,2
8	МБ-990	Нефелино-апатитовая руда	11,0	10,0	1,1
9	МБ-390	Уртиты висящего бока	12,0	10,0	1,2
10	МБ-690, 790, 890	Рисчорриты висящего бока	14,0	10,0	1,4
Восточный рудник Карьер Коашва					
11	МБ-70191	Вмещающие ййолит-уртиты (СЗ фланг рудной залежи)	11,0	20,0	0,55
12	МБ-70291	Апатито-нефелиновая рудная залежь	10,0	44,0	0,227
13	МБ-70391	Вмещающие ййолиты, уртиты, рисчорриты (южный фланг рудной зоны)	8,8	24,0	0,367
Карьер Ньюорпахк					
14	МБ-70891	Вмещающие ййолиты, уртиты, рисчорриты (северный фланг рудной залежи)	15,0	14,0	1,071
15	МБ-70791	Апатито-нефелиновая рудная залежь	15,0	11,0	1,364
16	МБ-70991	Вмещающие ййолиты, уртиты, рисчорриты (южный фланг рудной зоны)	10,0	28,0	0,357
Карьер Суолуайв					
17	МБ-70591	Вмещающие уртиты, рисчорриты (северный фланг рудной залежи)	13,0	43,0	0,302
18	МБ-70491	Апатито-нефелиновая рудная залежь	11,0	53,0	0,208
19	МБ-70691	Вмещающие уртиты, ййолиты (южный фланг рудной залежи)	12,0	22,0	0,545

В целом, количество минеральных видов-концентраторов редких и радиоактивных компонентов обнаруживают тенденцию к увеличению в рассматриваемом направлении, с запада на юг и восток по «Хибинской дуге», т. е. с приближением к Ловозерскому массиву. Это обстоятельство свидетельствует не только о существенном изменении количественных соотношений между апатитом и минералами-концентраторами титана, включая сфен, в пользу последних в рудах фланговых месторождений «Хибинской дуги» (Олений ручей и Партомчорр), но и, соответственно, об увеличении их «вклада» в уровни естественной радио-

активности этих месторождений, где прогнозируются повышенные содержания акцессорных минералов-концентраторов титана, редких металлов и радиоактивных компонентов, максимальные на глубоких горизонтах. Очевидно, что такой прогноз ориентирует на проведение комплекса прикладных минералого-геохимических исследований методами малообъемного картирования на этих месторождениях в связи с принятием ОАО «Акрон» и компанией СЗФК решения об их вовлечении в промышленное использование (2012–2013 гг.), в том числе – в целях радиоэкологической оценки промышленно-ценных концентратов, отходов обогащения, пы-

лей и рудничных стоков. В соответствии с лицензией на недропользование здесь, помимо профилирующих продуктов, должно быть организовано извлечение сопутствующих РЗМ при переработке апатитовых концентратов с применением азотнокислой технологии на заводе в Великом Новгороде, где уже проводятся соответствующие технологические испытания. Поэтому опережающее в процессе эксплоразведки погоризонтное изучение и прогнозирование минералого-геохимической специфики обрабатываемых руд имеет определяющее значение в обеспечении стабильности и эффективности химико-технологических переделов, в т. ч. с учетом радиационно-экологического фактора. На месторождении Партомчорр, в рудах которого содержания минералов-концентратов титана достигают 10–15 % при значительно меньших – апатита, рекомендуемый комплекс опережающих минералого-геохимических исследований должен включать составление поминеральных балансов распределения титана, редких и радиоактивных компонентов.

С геолого-экономических позиций вышеуказанные преимущества хибинского апатита как уже добытого и перерабатываемого сырья в объемах до 10 млн. т/год при 12 тыс. т/год лопарита в последнее десятилетие и нескольких тыс. т/год в настоящее время свидетельствуют о его очевидной перспективности и конкурентоспособности в качестве 2-го в Кольском регионе стабильного источника РЗМ с сопутствующим стронцием. С этих же позиций нами с 2007 г. оцениваются возможности и перспективы получения редкоземельной и стронциевой продукции из фосфогипса как объемного «отхода» переработки апатита на фосфорные удобрения сернокислотным способом на заводах «ФосАгро» [8, 9, 10].

Однако, все указанные преимущества редкоземельно-фосфатного сырья и отходов его сернокислотной переработки с 30-х годов прошлого столетия остаются нереализованными в промышленные технологии, включая извлечение стронция и дезактивацию их концентратов. В настоящее время, помимо известных разработок в лабораторных условиях химических методов (ВИМС, ВНИИХТ, ИХТРЕМС КНЦ РАН) извлечения РЗМ из апатита, фосфогипса и фосфорной кислоты, особое внимание привлекает разработка ООО «ЛИТ» компании «Скайград» инновационных способов их извлечения из фосфогипса и

селекции по группам (см. табл. 4) с применением каскада экстракционно-центробежных установок [11]. В основе этой технологии – промывка фосфогипса слабым раствором серной кислоты, что, прежде всего, позволяет извлекать РЗМ и стронций из содержащих их минеральных новообразований, оказавшихся «характерными» как для «свежего», так и лежалого фосфогипса. В фосфорной кислоте содержится всего лишь 10–15 % иттриевоземельных металлов от их содержания в фосфогипсе, что не позволяет считать это направление химико-технологических исследований способным обеспечить их выпуск в необходимых промышленных объемах.

Ознакомление в 2012 г. с организацией процесса экстракционно-центробежного извлечения РЗМ в ООО «ЛИТ» (г. Королев) свидетельствует об отсутствии у разработчиков этой технологии необходимой информации об уровнях концентрации в исходном фосфогипсе и получаемом редкоземельном продукте тория и урана, концентрация которых в последнем, как оказалось, превышает ПДК. Кроме того, разработка ведется без учета данных геохимического картирования (ГХК) объемных хранилищ фосфогипса (до 45–130 млн. т), которые необходимы для обеспечения стабильности его переменного поликомпонентного состава (P_2O_5 , F, TR, Sr, Th, U и др. микрокомпоненты, недоизвлеченные кислоты и т. д.). Рекомендуемое малообъемное опробование и геохимическое картирование (ГХК) может осуществляться как в целом по хранилищам, так и по блокам, подготавливаемым к переработке, а его результаты использоваться при усреднении состава фосфогипса до уровней, соответствующих сопряженным задачам получения обезвреженного товарного гипса и сопутствующих редких металлов. Как известно, фосфогипс Воскресенского завода минеральных удобрений накоплен не только за счет переработки хибинского апатита, но и фосфоритов Каратау, для которых характерны как повышенная радиоактивность, так и содержания супертоксичных мышьяка и кадмия. С другой стороны, залежи фосфогипса Уваровского завода в Тамбовской области загрязнены паводковыми водами, а остальные (Балаковский, «Аммофос», Волховский ЗМУ и др.) представлены фосфогипсом переменного состава, обусловленного различиями в составе исходных апатитовых концентратов, переработанных за многие

десятилетия с различных эксплуатационных горизонтов нескольких месторождений Хибин.

С этих позиций авторам разрабатываемых технологий извлечения РЗМ из фосфогипса рекомендуется осуществлять их с учетом комплексного характера этого техногенного сырья, результатов опережающего геохимического картирования хранилищ фосфогипса с выделением химически однородных блоков наиболее качественного обезвреженного и дезактивированного редкоземельно-гипсового сырья и, наконец, в условиях систематического контроля за содержаниями в нем и получаемой химической продукции естественных радионуклидов.

Месторождения иттриевоземельного сырья как объемы ускоренного промышленного освоения: специфика состава и радиоактивности

Эвдиалитовое сырье Ловозерского массива, в отличие от лопаритового и хибинского апатитового, характеризуется повышенными (в 2–10 раз) содержаниями РЗМ средней и тяжелой групп, включая наиболее востребованные в настоящее время Sm, Gd, Tb, Er, Y (см. табл. 3), а также циркония (11–13 % ZrO_2) гафния (0,21–0,27 % HfO_2), тантала (0,06–0,1 % Ta_2O_5), ниобия и титана (0,6–1 % Nb_2O_5 и TiO_2), стронций (0,21–1,48 % SrO) [12]. Таким образом, эвдиалитовое сырье следует рассматривать и оценивать, прежде всего, как легкодоступный и крупномасштабный источник РЗМ иттриевоземельной группы и иттрия в комплексе с указанными редкими металлами, среди которых цирконий из-за низких содержаний относительно других его источников (60–90 % ZrO_2) может рассматриваться только как попутный компонент. Среди всех остальных редкоземельно-редкометалльных сырьевых источников РЗМ эвдиалитовое является единственным нерадиоактивным: содержания в рудах тория – 40 г/т и урана – 20 г/т, а в концентратах – 62–82 г/т (табл. 7).

Эвдиалитовые руды слагают месторождения в приводораздельной части Ловозерского массива, что обуславливает возможности их добычи открытым способом и доставки к железной дороге у западного подножия массива с использованием системы рудоспусков и бремсбергов. Тем самым значительно сокращаются издержки, неизбежные при подземной добыче лопаритовых руд, доставляемых рудничным транспортом на дневную поверхность.

Эвдиалит, в отличие от мелкозернистого лопарита в мелкозернистых и сливных урти-

тах, представляет собой породо- и рудообразующий минерал луявритов и ювитов с содержаниями в этих породах до 20–30 %, что обеспечивает высокую обогатимость эвдиалитовых руд гравитационно-магнитной сепарацией с извлечением эвдиалита в концентрат на 75–80 %. Принципиально важной является повышенная ценность эвдиалитовых ювитов, которые, в отличие от луявритов, содержат сопутствующий лопарит, обогащенный относительно традиционно добываемого танталом в 1,5–2 раза (до 1,3 % Ta_2O_5 и 12,9 % Nb_2O_5).

Технология обогащения позволяет получать в магнитной фракции эвдиалит и эгириин, а в немагнитных хвостах – нефелин-полевошпатовый продукт. После сушки из коллективного магнитного концентрата электромагнитной сепарацией получают селективные эвдиалитовый (непроводящий) и эгириновый (проводящий) концентраты. Высокая рентабельность производства конечной химико-металлургической продукции из эвдиалита, согласно оценкам ГИРЕДМЕТа, может быть обеспечена объемами ежегодной добычи и переработки 1 млн. т руды с получением 187,5 тыс. т эвдиалитового концентрата [12]. Технология глубокой и полной химической переработки легкорастворимых эвдиалитовых концентратов кислотными методами разработана в различных вариантах ВНИИХТом, ГИРЕДМЕТом, ИХТРЭМСом КНЦ РАН и РХТУ им. Д. И. Менделеева. В зависимости от применяемых реагентов из эвдиалита получены различные комплексы товарных химических продуктов при ведущей роли в извлекаемой ценности иттрия, ассоциирующих с ним РЗМ средне-тяжелой группы и тантала. С техноэкологических позиций наиболее оптимальной представляется сернокислотная технология ВНИИХТ, ранее разработанная О. А. Аржаткиной (2000–2001 гг.) применительно к переработке лопаритовых концентратов непосредственно на месте их производства, т. е. на территории Ловозерского ГОКа [13]. На первом этапе переработки 10 тыс. т эвдиалита в год можно получать 0,66 кг Gd, 0,63 кг Dy и 0,3 кг Eu для удовлетворения потребностей Чепецкого механического завода в г. Глазове в Удмуртии. На втором этапе при переработке 50–100 тыс. т эвдиалита прогнозируются технологические возможности и экономическая целесообразность выпуска широкого ассортимента индивидуальной редкоземельной и высоколиквидной редкометалльной продукции, включая цирконий,

гафний, тантал и др., а также аморфного кремнезема и целого ряда промежуточных побочных продуктов – Si-Zr-x, Fe-Zr-x и марганцевых кеков, сульфатов и хлоридов натрия и т. д. Не следует забывать также о возможностях эффективного использования легкоплавкого и нерадиоактивного эвдиалита в производствах люющих глазурей и эмалей, специальных стекол, сварочных флюсов, обмазок для электродов, а также в качестве добавки в производствах модифицированных чугунов и сталей, спечсплавов и электродов. В перспективе представляется возможным использование эвдиалита в производствах металлокерамики и сверхпроводящих материалах.

Согласно расчетам по достижении проектной мощности производства эвдиалитового концентрата в 187,5 тыс. т/год при капитальных затратах порядка 140 млн. долл. прибыль для сернокислотной схемы составит 35 млн. долл. при окупаемости за 4,5 года и рентабельности 22 % [12].

Рекомендуемая организация потенциальным инвестором при государственной поддержке производства эвдиалитового концентрата, иттриевоземельной, сопутствующей химической и термохимической продукции с использованием базы Ловозерского ГОКа, включая помещение бывшей Умбозерской ОФ, предусматривает поэтапное развитие соответствующих производств в форме малых и средних горнотехнологических предприятий (МГТП), совокупность которых в перспективе позволит создать локальный редкометалльно-редкоземельный научно-производственный кластер.

Ринколит-ловчорритовое сырье в 30-х годах прошлого столетия было первым и единственным в СССР источником РЗМ и тория. Эти руды были выявлены в Хибинском массиве в конце 20-х – начале 30-х годов экспедициями Академии наук СССР под руководством академика А. Е. Ферсмана: впервые ловчоррит был обнаружен на плато Ловчорр, а затем ловчорритовые жилы были открыты в пределах гг. Тахтарвумчорра, Вудъяврчорра, Кукисвумчорра, Часночорра и, наконец, Юкспора, где отрядом АН СССР была обнаружена жильная серия нефелин-эгирин-полевошпатовых пегматитов с ловчорритом, представляющих промышленный интерес [14]. Рудная зона протяженностью в 1,8 км при ширине 200–250 м представлена здесь крутопадающими (80–85°) жильными телами эгирин-нефелин-полевошпатовых пегматитов, залегающими как в эгирин-роговообманковых нефе-

линовых сиенитах, так и в рисчорритах. Длина каждой из жил варьирует от нескольких метров до 200–339 м при мощности в раздувах до 10 м. Выходы жил на дневную поверхность и штольни расположены на крутом склоне хр. Юкспор до тальвега р. Гакмана.

Таблица 7

Содержания (г/т) тория и урана и их соотношения в промышленно-ценных минералах-концентраторах РЗМ из приоритетных видового сырья и техногенных ресурсов России

Радионуклиды Минералы (месторождения)	Th	U	Th/U
Лопарит (Ловозеро)	4600	200	23
Эвдиалит (Ловозеро)	60–80	20	3–4
Апатит (Ловозеро, горизонт II-7)	140	–	–
Апатит (Хибины)	10–31	3,5–15,0	2–5
Ловчоррит (Хибины, долина Гакмана)	≤10000	200	50
Фосфогипс (отходы фосфатного производства), Балаковский БМУ	15	3	5
Монацит (складированный концентрат), Красноуфимск	55400	2000	27,6
Куларит (хвосты обогащения золоторудной россыпи), юг Якутии	11000	–	–
Природный концентрат (Томтор, СЗ Якутии)	1500	50	30

Разведка Юкспорского месторождения проводилась в период 1930–39 гг., а эксплуатация началась в 1932–33 гг. с отбора рудоразборкой 30 т богатой руды с 40–45 % ловчоррита. Годовая добыча руды подземным способом в 1935–1938 гг. составляла 2615–4119 т при проектной мощности 8500 т/год. Всего за период работы Ловчорритового рудника (по 1939 г.) было добыто 19389 т руды [15].

На опытной обогатительной фабрике, построенной в 1933 г. в 6 км от рудника вниз по течению р. Гакмана и, далее, р. Юкспорйок на его левом берегу в пределах промплощадки фосфорного завода (23 км) в период 1933–1939 гг. было произведено 1184 т ловчорритового концентрата с выходом 6 % и максимальным выпуском 495 т в 1937 г. Технология обогащения включала 2-х-стадийное дробление, доизмельчение, концентрацию на столе и магнитную сепарацию; в дальнейшем она была дополнена флотацией ловчоррита из шламов. Не высокое содержание ловчоррита в руде (4–6 %) обусловило низкое качество концентрата –

до 40 % при 7 % TR_2O_3 и большие потери в хвостах. За счет организации на руднике ручной доразборки содержание ловчоррита в рудной массе удалось повысить до 10 %. Однако, и это не позволило удовлетворить более высокие требования потребителя и переработчика ловчорритовых концентратов – «Главредмет», что явилось основанием для закрытия производства. Тем более, что на смену Ловчорритовому руднику появился несоизмеримо более мощный и перспективный Ловозерский, из руд которого со временем стали производить до 70–80 % тантала, ниобия и редких земель и попутным титаном.

Ловчоррит как фторсодержащий титаносиликат кальция, натрия и редких земель (стекловидная разновидность ринколита) содержит 11–17 % TR_2O_3 и 0,5–1,0 % ThO_2 при 0,02–0,025 % U_3O_8 , а также до 2 % Nb_2O_5 и Ta_2O_5 [16]. Технология извлечения РЗМ, разработанная в Ломоносовском институте АН СССР, включала вскрытие соляной кислотой, осаждение гидратов редких земель аммиаком, фильтрацию и обработку смесью плавиковой и соляной кислотами с получением фторидов РЗМ.

В настоящее время хибинский ловчоррит-ринколит привлекает внимание как возможный источник иттрия (1,26–1,36 %) и сопутствующих иттриевоземельных лантаноидов, РЗМ церий-лантановой группы, тория и, возможно, скандия. Юкспорское месторождение, вскрытое подземными горными выработками общей протяженностью около 1 км в скальных породах, расположено на границе с подземным пространством апатитового Кировского рудника, где еще в середине 40-х годов на горизонте +392 м (квершлаг №7) была обнаружена богатая ловчорритовая жила. Известно, что геология (В. Н. Годовиков) и руководство комбината «Апатит» (В. И. Кондриков, М. Н. Селезнев и др.) неоднократно возвращались к идее о доразведке Юкспорского ловчорритового рудника, особенно на глубину. Тем более, что даже ранее разведанные параметры месторождения с учетом довоенной переоценки запасов в 355,8 тыс. т при содержаниях 1,12 % $\text{TR}_2\text{O}_3 + \text{ThO}_2$, т. е. в 2 раза превышающих прежние 1935 г. [15], позволяют оценивать это месторождение как объект для отработки и доставки на новые обогатительные установки в сохранившихся зданиях бывшей ловчорритовой, а затем сфеновой фабрики руды с других участков Хибин. Очевидны также возможности повышения эффективности обогаще-

ния ловчорритового сырья за счет его рентгено-радиометрической сепарации, применения нового флотационного оборудования и реагентов, электромагнитных сепараторов и т. д. Не исключается также организация глубокой химической переработки ловчоррита-ринколита на месте, т. е. в районе гг. Кировска и Апатитов химиками-технологами ИХТРЭМС КНЦ РАН и других научных организаций.

Содержания тория в ловчоррите не могут служить препятствием для его переработки с извлечением иттрия, иттриевоземельных и других лантаноидов, т. к. они примерно соответствуют содержащимся и допустимым (?) в якутском куларите и в 5 раз ниже, чем в красноуфимском монаците (см. табл. 7).

В то же время в районе деятельности бывшего ловчорритового производства необходимо проведение радиационно-экологического картирования. Выборочными радиометрическими замерами, выполненными нами в 1990–91 гг. на Ловчорритовом руднике, установлено, что преобладающий радиационный фон внутри главной штольни составляет 700 мкр/час, а непосредственно в стенках подземных выработок, пройденных в рудных телах, зафиксирована гамма-активность в 1200–1600 мкр/час. У входа в Главную штольню радиоактивный фон не превышает 140 мкр/час, в осыпи на склоне фиксируется от 200 до 110 мкр/час, а в тальвеге реки – 80 мкр/час; для воды в р. Гакмана под штольнями и из скважины характерны 30–40 мкр/час [6]. Таким образом, бывший рудник как природно-исторический объект представляет собой вполне определенный источник радиационной опасности при длительном нахождении в зоне ее действия, вдыхании рудничной пыли, употреблении местной питьевой воды, транспортировке и хранении образцов ловчоррита-ринколита. Эта ситуация как минимум требует установки для посетителей разъяснительных и предупреждающих о радиационной безопасности надписей и специальных знаков, а в перспективе – проведения детальной радиометрической съемки с сопровождающей радиогеохимической заверкой выявляемых аномалий.

В связи с этим необходимо также детальное радиогеохимическое картирование района бывшей фабрики, хвосты которой могли «питать» сток р. Юкспорйок и его устье при впадении в оз. Большой Вудьявр, служившее ранее источником водозабора для г. Кировска из поверхностных вод. В условиях морозного выветри-

вания и водной среды скрытокристаллический и частично аморфный ловчоррит-ринколит легко подвергается изменениям с образованием вудьяврита и мозандрита с последующим полным растворением. Это могло обеспечить полное выщелачивание не только тория и урана, но и содержащегося в исходных минералах фтора (до 4–5 %), с переходом их в подвижное состояние и переотложением в донных осадках, включающих такие сорбенты как илистые фракции, отложения мазутных остатков с Кировской ГРЭС на дне оз. Б. Вудьявр и т. д. Как известно, такие осадки, особенно загрязненные радиоактивными компонентами, представляют собой канцерогены и поэтому требуют специальных исследований и оценки как возможные дополнительные факторы онкологических заболеваний населения.

Апатито-лопаритовое сырье горизонта II-7 как богатое фосфатно-редкоземельно-редкометалльное сырье Ловозера: распределение редких и радиоактивных элементов и перспективы освоения

Апатито-лопаритовые руды горизонта II-7 представляют собой естественный петрографо-минералогический элемент (ритм) многопорядковой расслоенности «полнодифференцированного комплекса» Ловозерского массива апатитовых нефелиновых сиенитов, вскрытого эрозией в его западной части. К ней приурочены подземные рудники ОАО «Ловозерский ГОК» (ЛГОК), эксплуатирующей лопаритсодержащие уртиты как комплексное сырье для выпуска профилирующей танталовой, ниобиевой, редкоземельной и сопутствующей титановой продукции. Апатито-лопаритовые руды для предприятия являются нетрадиционным, более комплексным фосфатно-редкоземельно-редкометалльным сырьем. В 80–х годах они привлекли внимание бывших руководителей Ловозерского ГОКа (Г. В. Вебер, И. Г. Аргамаков и др.), прежде всего, как принципиально новое, потенциально перспективное сырье, добыча которого, в отличие от традиционного подземного и затратного способа, может осуществляться более рациональным с экономических и социально-экологических позиций открытым способом. Опытнo-промышленная эксплуатация была организована в карьере вблизи рудника Карнасурт на участке Карнасурт-открытый. В случае успеха имелись в виду перспективы создания еще нескольких эксплуатационных участков в пределах выходов на дневную поверхность пород и руд

горизонта II-7, который простирается вдоль склона более чем на 20 км.

Однако в процессе обогащения апатито-лопаритовой руды традиционными физико-механическими методами на местной обогатительной фабрике, где было организовано получение нового концентрата, возникли непредвиденные трудности. Они были обусловлены повышенной плотностью и прочностью тонкозернистой рудной массы, затрудняющими ее измельчение, и практической невозможностью селективного получения рафинированных апатитового и лопаритового концентратов. Более того, принятая на фабрике практика усреднения состава руд с различных участков обуславливала загрязнение фосфором традиционного товарного концентрата, что вызвало рекламации со стороны потребителя.

В связи с этим автором от ИМГРЭ были организованы специальные исследования апатито-лопаритовых руд по договору с ЛГОКом, результаты которых позволяли надеяться на положительное решение в ближайшей перспективе вопроса о вовлечении в эксплуатацию и комплексное промышленное использование этого нетрадиционного сырья, уникального по своему минеральному и химическому составу, извлекаемой ценности и преимуществ открытой добычи.

Детальное изучение внутреннего строения и состава ритма расслоенности Ловозерского комплекса, представленного породами и рудами горизонта II-7, выполнено в разрезах вкрест его простираения, т. е. практически по мощности в условиях хорошей обнаженности, обеспечиваемой взрывными работами в карьере. Документация петрографо-минералогических элементов расслоенности сопровождалась их опробованием в нескольких профилях, а затем составлением групповых проб по каждой разновидности пород и руд. Все пробы-протоочки были подвергнуты прямым количественно-минералогическим анализам (легкая и тяжелая фракция), а их дубликаты – силикатным химическим анализам и определениям редких и радиоактивных элементов количественными физико-химическими методами в лабораториях ИМГРЭ. Это позволило индивидуализировать каждый из элементов расслоенности по специфике его минерального и химического состава, которые в сравнении друг с другом оказались достаточно контрастными и, в то же время, обнаружить устойчивые признаки их общности и преемственности в направлении от подошвы к кровле горизонта II-7. Необходимо отметить, что общая

субгоризонтальная расслоенность рассматриваемого ритма на 3 основные фации, представленные со стороны лежачего бока (подшвы) лувритами, в центре – рудными уртитам (малиньитами) и в висячем боку (кровле) фойяитами, в свою очередь, осложнена расслоенностью следующего порядка, включающей непосредственные обособления рудного вещества.

Таким образом, в распределении главных промышленно-ценных минералов в разрезе по мощности эксплуатируемой части горизонта II-7 установлена следующая закономерность: лопарит преимущественно сосредоточен в урритах, т. е. в породах осевой части ритма расслоенности, и, в меньшей степени, в лувритах лежачего бока; апатит также, в основном, связан с урритами, хотя значительные его количества обнаруживаются и в фойяитах висячего бока; эвдиалит представляет собой третий, пока не учитываемый промышленно-ценный минерал, содержащий, помимо циркония, определенное количество ниобия, тантала, редких земель и гафния; его содержания максимальны в лувритах и особенно в их пегматитах. Эти данные свидетельствуют о возможности значительного увеличения выемочной мощности рудного слоя за счет вовлечения в отработку лувритов лежачего бока и, возможно, фойяитов – висячего, что требует, однако, проведения дополнительных исследований на других участках горизонта II-7 [17].

Поминеральные балансы распределения ведущих редких минералов и радиоактивных элементов, составленные для всех рудных фаций горизонта II-7, позволяют оценить количественные соотношения между концентрированными и рассеянными формами их нахождения в апатито-лопаритовом сырье и, тем самым, получить объективные исходные данные для решения задач их комплексной переработки и использования, а также для сопоставления их промышленной ценности сравнительно с традиционно эксплуатируемыми рудами лопаритовых урритов [17].

В изученных рудах апатито-лопаритовых урритов до 95 % тантала и 92 % ниобия связано с лопаритом и эвдиалитом, причем на долю последнего приходится всего лишь 0,6 % ниобия и 0,8 % тантала. В лопаритсодержащих лувритах и фойяитах горизонта II-7 **степень концентрации ниобия и тантала несколько ниже: 78,1–95,1 % и 84,1–92,6 % соответственно.** Это обусловлено повышенным содержанием в них

эвдиалита, с которым связано 1,3–10,1 % ниобия и 1,3–5,3 % тантала. В рудных пегматитовых фациях и пегматоидных катаклазитах лувритов и фойяитов установлена максимальная степень рассеяния ниобия (до 83,8 %) и тантала (до 50 %) в неизвлекаемых минералах группы ломоносавита-мурманита, энigmatита и других минералах-концентраторах титана. Кроме того, здесь ведущая роль минерала-концентратора ниобия (81 %) и тантала (87,8 %) принадлежит эвдиалиту, который количественно преобладает на лопаритом.

Редкоземельные элементы в апатито-лопаритовых урритах преимущественно сосредоточены в структурах лопарита (52,1 %) и апатита (44,7 %), в то время как основное количество стронция связано с апатитом (92 %). В лопаритсодержащих лувритах и фойяитах степень концентрации (75,9–85,1 %) РЗЭ и особенно стронция (30–64 %) заметно ниже, причем первые преимущественно связаны с лопаритом при доле апатита 6,7–25,1 %, в то время как стронций преимущественно сосредоточен в структурах апатита (23,9–56,5 %) и, в меньшей степени, эвдиалита (4,5–18,3 %) при незначительной роли лопарита. В пегматитах ведущим минералом-концентратором РЗЭ и стронция является эвдиалит – на 90,4 % и 84 % соответственно. В рудных пегматоидных катаклазитах обнаружена максимальная степень концентрации РЗЭ (70 %) и особенно стронция (83,8 %) в апатите, т. е. в минералах изоморфного ряда «apatит-беловит-накафит», что подтверждается и составами «apatитовых» концентратов, выделяемых из апатито-лопаритовых руд горизонта II-7.

Уран и торий как лимитируемые микрокомпоненты на 82,7 % и 92,8 % сосредоточены в структуре лопарита рассматриваемых рудных урритов. В рудных лувритах и фойяитах степень их концентрации в лопарите за счет уменьшения его количества заметно снижается – до 32,7–50,9 % для урана и до 42,6 % для тория, причем максимально – в фойяитах. Наиболее высокая степень концентрации урана в лопарите (79 %) установлена в рудных пегматитах, хотя количество самого лопарита здесь не высоко. Максимальное рассеяние урана и тория относительно их концентрации в лопарите установлено в рудных пегматоидных катаклазитах – до 50 % и 87,2 % соответственно, что свидетельствует о присутствии в их легкой фракции собственных минералов-концентраторов радиоактивных элементов [17].

Сравнительный анализ средних содержаний и извлекаемой ценности ловозерских и хибинских апатитовых концентратов свидетельствует о том, что по уровням концентрации сопутствующих стронция и РЗЭ, особенно европия и иттрия, первые превосходят вторые в несколько раз (табл. 8) и поэтому в большей степени заслуживают определения в качестве химического фосфатно-редкоземельно-редкометалльного сырья.

Установленная нашими исследованиями значительная обогащенность ловозерского апатита РЗМ и стронцием обусловлена присутствием в его концентратах беловита, в структуре которого Na, TR и Sr заменяют кальций. Тем самым плотность апатита-беловита повышается с 3,25 г/см³ до $\geq 4,26$ г/см³ (при плотности лопарита 4,85–5,05 г/см³), что является, помимо их взаимного срастания на уровне кристаллов, еще одной из причин, препятствующих селективному выделению апатита и лопарита из руды горизонта II-7.

Расшифровками состава элементов редкоземельной группы в TR-Sr-х апатитах инструментальным методом установлено преобладание церия (29 кг/т) и лантана (17 кг/т), повышенное содержание самария (1,3 кг/т) и, в меньшей степени, иттрия (740 г/т), европия (350 г/т), тербия (100 г/т) и иттербия (60 г/т). Кроме того, количественно-спектральным методом фиксируются неодим (11 кг/т), гадолиний 1,2 кг/т), диспрозий (390 г/т) и гольмий (30 г/т). Максимальную ценность с позиций современной конъюнктуры среди этих элементов представляют иттрий и Nd, Eu, Gd, Dy, Tb, Yb. Средние содержания тория в мономинеральном ловозерском апатите 140 г/т больше, чем в хибинском, но значительно ниже его содержаний в лопарите. Аномально высокие содержания тория в концентратах – 4,3 кг/т обусловлены сростками апатита с лопаритом, не поддающимися разделению при гравитационном обогащении на ОФ ЛГОКа. Содержания урана в апатитах – первые десятки г/т, т. е. минимальные [17].

Таким образом, главной задачей, необходимой для продолжения и развития работ по промышленному освоению апатито-лопаритового сырья горизонта II-7 остается инновационно-технологическая. Очевидны возможности сернокислотной и азотнокислотной переработки как лопарита, так и апатита с получением соответствующих редкоземельных, редкометалльных, фосфатных и фторидных продуктов. Однако, при

этом сохраняется недостижимая необходимость раздельного получения и рафинирования их концентратов. Кроме того, возникает проблема обеспечения экологической безопасности, включающая задачи нейтрализации объемных и токсичных кислотных сбросов в прибрежной зоне оз. Умбозеро как рыбоохранного водоема, а также устранения радиоактивности из технологических процессов и их продуктов.

Таблица 8

Сравнительная характеристика ловозерского и хибинского апатитовых концентратов по содержаниям фосфора и главных сопутствующих полезных компонентов

Концентраты	Содержание главных промышленно-ценных компонентов					
	P ₂ O ₅ , %	TR ₂ O ₃ , %	SrO, %	Y ₂ O ₃ , г/т	Eu ₂ O ₃ , г/т	F, %
Ловозерский (горизонт II-7)	36,5	4,6–7,6 (в среднем 6,1)	2,0–11,0 (в среднем 6,5)	960	320	0,93–3,44
Хибинский	39,5	0,94	1,95	280	50	3,2

В связи с этим нами были выполнены поисковые экспериментально-технологические исследования применимости ликвационной плавки в качестве прямого пирохимического способа разделения и избирательного концентрирования компонентов лопарита и апатита в несмешивающихся фазах расплава контрастного состава, имитирующего состав необогащенной руды. Шихта для плавки готовилась из смеси стандартного лопаритового концентрата ЛГОКа и апатитового концентрата ОАО «Апатит» с добавками двух флюсов – солевого и железисто-силикатного. Плавка проводилась при T = 1050° С в окислительной среде в стальных тиглях с фарфоровыми вкладышами в зоне максимального нагрева силитовой печи при атмосферном давлении (в открытых тиглях) или под собственным давлением пара расплава (в герметизированных тиглях с завинчивающимися крышками и самоуплотняющимися металлическими прокладками). По истечении 15–30 мин. тигли с плавом резко охлаждались (закачивались) и затем вскрывались алмазной пилой в вертикальном сечении. Во всех опытах, после многократных подборов флюсов, обеспечивающих плавление тугоплавкого лопарита в стекло при указанной температуре, обнаружено четкое расслаивание расплава на две несмешивающиеся жидкости, которые фиксируются

закалкой в виде двух слоев: верхнего – светлого, фарфоровидного, кальцево-фосфатного и нижнего – темно-бурого, стеклокристаллического, железисто-редкометалльного. Между этими двумя основными фазами контрастного состава образуется субгоризонтальная линзовидная полость, подобная усадочной раковине. В отсутствие флюсов не происходит ни плавления лопарита, ни расслаивания расплава. Определения содержаний редких металлов, включая индивидуальные РЗМ, и тория в редкометалльном и кальцево-фосфатном продуктах плавки свидетельствуют об обогащении первого из них относительно второго танталом почти в 10 раз и ниобием – в 5,5, а Zr, Hf, Sc и редкоземельными элементами (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) – в 3 раза. В то же время стронций относительно равномерно распределяется между сосуществующими в жидком состоянии слоевыми фазами. Торий преимущественно концентрируется в редкометалльном слое, хотя его содержания (0,28 %) в 1,5–2 раза ниже, чем в лопарите из рассматриваемых ловозерских руд; фосфатный слой беднее торием в 5 раз (0,048 %).

Полученные результаты открывают перспективу сепарирования и избирательного экстрагирования несмешивающимися жидкими фазами всех ценных и лимитируемых компонентов измельченных и флюсованных апатитолопаритовых руд и продуктов их обогащения, включая черновые коллективные концентраты, а также шламы обогатительных фабрик. Во всех вариантах ликвационной плавки продукты расслаивания расплава (слои), благодаря различиям в плотности, вязкости и поверхностном натяжении, контрастно распределяются по высоте тигля и легко могут быть отделены друг от друга в жидком или твердом состояниях. Полученные за одну операцию плавленные концентраты или промпродукты, обогащенные ценными компонентами и рафинированные от лимитируемых (например, от фосфора, титана, кремния, тория и др.), могут быть подвергнуты дальнейшим селективным переделам, как пиromеталлургическим в восстановительных условиях, так и гидрохимическим, включая использование кислотных методов и жидкостной экстракции. Тем самым открываются перспективы разработки коротких комбинированных схем для глубокой переработки апатитолопаритового и других видов «упорного» природного и техногенного сырья, содержащего особо ценные и

лимитируемые (технологически и экологически) микрокомпоненты непосредственно на месте, в том числе – с использованием модульного оборудования для оперативной отработки небольших месторождений без капитального строительства. Следует иметь в виду, что авторскими экспериментально-технологическими разработками для различных видов редкометалльного сырья доказана принципиальная возможность использования сепарирования и селективного извлечения за одну операцию изоморфных тантала и ниобия, вольфрама, висмута и серебра из силикатно-редкометалльного сырья, ниобия с редкими землями и фосфора со стронцием и торием – из силикатно- и карбонатно-фосфатно-редкометалльного сырья, включая труднообогатимые коры выветривания карбонатитов и шламы обогащения [18].

Реализация авторских рекомендаций руководству ЛГОКа на продолжение работ по вовлечению в промышленную отработку открытым способом рудного горизонта II-7, к сожалению, не была поддержана новым руководством комбината по совокупности причин, в том числе – начавшегося спада производства в условиях «переходного периода». При условиях обоснованной возможности увеличения мощности вскрыши рудного горизонта II-7 в 2–3 раза и ввода в эксплуатацию еще нескольких участков по его простиранию (Аллуайва, Северного и др.) выпуск лопаритового концентрата может превысить 12 тыс. т, а попутного TR-Sr-го апатита – 35 тыс. т/год. Таким образом, мощности профилирующего производства ЛГОК могут быть обеспечены за счет замены подземной добычи открытым способом примерно на 50 %, что представляется весьма перспективным с экономических и социально-медико-экологических позиций, так как позволит вывести на дневную поверхность персонал и технику. В настоящее время эта перспектива приобретает особую актуальность в связи с консервацией 2-го подземного Умбозерского рудника и одноименной фабрики.

Проектная мощность бывшего карьера Карнасурт-открытый позволяла рассчитывать на производство 2116 т лопаритового (при выходе 1,4 %) и 5650 т TR-Sr-apatитового (при выходе 3,8 %) концентратов в год. При этом передел апатитового концентрата, согласно расчетам по средним содержаниям РЗМ и Sr, может обеспечить ежегодный выпуск 276 т редких земель и 294 т стронция. Увеличение объемов добычи

апатито-лопаритовых руд до 1 млн. т/год за счет ввода в эксплуатацию новых участков горизонта II-7 позволит ежегодно получать 1850 т редких земель и 2000 т стронция. за счет переработки TR-Sr-апатита в соответствии с двумя рассчитанными авторскими вариантами развития производственных мощностей ЛГОКа по выпуску TR-Sr-апатитового концентрата. Получение эквивалентных количеств редких металлов из хибинского апатита требует для стронция в 3,3 раза больших объемов их поставок и переработки, а для редких земель – в 6,5 раз больших. Эти данные свидетельствуют о возможном общероссийском, а не только местном значении рассматриваемого вопроса и ориентируют на продолжение и интенсификацию связанных с ним минералогических исследований, начатых по нашей инициативе 25 лет назад [17].

Таким образом, на базе указанных месторождений Хибин и Ловозера могут быть заложены основы создания Хибинско-Ловозерского редкоземельно-редкометалльного кластера, в который могут быть включены и другие источники РЗМ, богатые иттрием, но пока остающиеся невостребованными. Не следует забывать, что первым в СССР промышленным источником РЗМ, обогащенным иттрием, был Ловчорритовый рудник в Хибинах. Это месторождение до сих пор не потеряло своего значения в качестве единственного и богатого источника собственно иттриевого сырья в Хибинах, обогащенного торием.

Перспектива Кейвской щелочногранитной провинции на иттрий, иттриевые лантаноиды и сопутствующие редкие металлы

В центре Кольского региона выделяется своей иттриево-редкоземельной специализацией Кейвская провинция щелочных гранитов и связанных с ними жильных пегматоидов, альбититов и силекситов. Минералы-концентраты иттрия и других РЗМ представлены в них иттробритолитом (Сахарйок), иттриевым флюоритом (г. Плоская), гадолинитом и т. д. Эти и другие месторождения и рудопроявления Кейв как слабо вскрытые эрозией объекты незавершенных поисково-оценочных работ на цирконий, тантал или амазонит, рекомендуются для переоценки на РЗМ иттриевой группы и, возможно, скандий.

Ниобий-редкоземельно-циркониевое месторождение Сахарйок, расположенное в 80 км от промплощадки Ловозерского ГОКа, приурочено к дайкообразному интрузиву миаскитов, с которым связана неравномерная вкрапленность

циркона и иттробритолита. Рудные концентрации локализованы в участках развития альбититов, один из которых площадью 2 км² был выделен специалистами ГИ КНЦ РАН в качестве перспективного и служил объектом поисково-оценочных работ Мурманской ГРЭ в 90-е годы. Согласно исследованиям И. Д. Батиевой и др., содержания в рудах иттробритолита варьируют в пределах 2–4 кг/т и циркона 5–12 кг/т. Кроме того, с ними ассоциируют флюорит (~10 кг/т) и пироксенол (300 г/т). Содержания редких земель в иттробритолите – 51–56 % TR₂O₃, из которых 21 % Y₂O₃. В цирконах установлены 65,7 % ZrO₂ и 1,34 % HfO₂, а также 0,02 % ThO₂ и 0,02 % U₃O₈.

В рудах содержания полезных компонентов составляют (в %): Y₂O₃ – 0,02–0,12, ZrO₂ – 0,5–2,0, Nb₂O₅ – 0,03–0,17 (при Nb/Ta = 15–25). Обогащением руд с использованием магнитно-гравитационной схемы получены концентраты иттробритолита (9,8 % Y₂O₃), циркона (60,23 % ZrO₂ при извлечении 55 %) и эгирина; возможно также попутное получение флюоритового и нефелин-полевошпатового концентратов. В ИХ-ТРЭМС КНЦ РАН разработана химическая технология переработки иттробритолитового концентрата со вскрытием его серной или азотной кислотами и экстракционным извлечением оксидов или солей иттрия и других РЗМ.

Прогнозная оценка ресурсов месторождения Сахарйок в 2,5 млн. т циркона и 350 тыс. т редких земель, включая 75 тыс. т Y₂O₃, позволяет рассматривать его в качестве инвестиционно привлекательного объекта, рентабельная отработка которого требует переработки до 3 млн. т руды в год, реализации цирконового и нерудных товарных концентратов и особенно иттриево-редкоземельной продукции. Создание на Сахарйокском месторождении малого или среднего горно-технологического предприятия (МГТП) для производства наиболее востребованной и ценной иттриево-редкоземельной и циркониевой продукции с попутными лантаноидами и гафнием представляется необходимым для продвижения и развития поисково-оценочных работ на редкие земли и другие редкие металлы в пределах Кейвской возвышенности и щелочногранитной провинции.

Плоскогорское месторождение жильных амазонит-альбитовых пегматоидных фаций-апофиз щелочных гранитов, служившее объектом добычи амазонита, согласно нашим исследованиям и рекомендациям в 90-х годах послужило объектом поисково-оценочных работ

Мурманской ГРЭ на тантал (с ниобием), а по данным А. В. Волошина (ГИ КНЦ РАН) перспективно на добычу ручной рудоразборкой гнездовых обособлений плюмбомикролита (до 26 % Ta_2O_5) и Y-флюорита (до 30 % Y_2O_3), приуроченных к лежащему боку Главного жильного тела (под кварцевым ядром). Главная жила простирается на дневной поверхности на 700 м при мощности порядка 10 м и характеризуется зональным строением по мощности, включая обособление крупной кварцевой линзы (ядра) в осевой части. Данные бурения скважин ПО «Северкварцсамоцветы» в процессе разведки на амазонит Главной жилы на г. Плоской на глубину в 60–70 м, проанализированные нами в начале 90-х годов в соответствии с разделом договорной работы с Ловозерским ГОКом, свидетельствуют о том, что на глубинах до 10–30 м по падению и склонению блоки амазонита и кварца сменяются мелкокристаллическим кварц-альбитовым комплексом, выполняющим жильные тела по всей мощности, вплоть до объединения совокупности жильных тел в субгоризонтальную залежь альбититов, представляющую апикальную часть щелочно-гранитной интрузии, не вскрытой эрозией. Проведенное нами с этих позиций выборочное опробование керн скважин на тантал показало сравнительно равномерное распределение его содержания на уровне 90 г/т в кварц-альбитовой части жильных тел, как правило, с незначительным преобладанием тантала над ниобием. Постоянно, наряду с тонковкрапленными минералами тантала, в керне скважин и на дневной поверхности наблюдается вкрапленность бледно-фиолетового и, реже, «лососевого» (по цвету) флюорита, состав которого требует изучения на иттрий и иттриевые лантаноиды в объеме рудных тел.

К сожалению, поисково-оценочные работы с бурением нескольких скважин по совокупности негативных факторов начавшегося «переходного периода» не были завершены с положительным результатом. Тем самым вопрос о перспективности на тантал (с ниобием) и иттриевые лантаноиды Плоскогорского месторождения и подобных ему объектов в Кейвах остается открытым. Согласно нашим наблюдениям, жильные проявления альбититов и силекситов в пределах Кейв, особенно с вкрапленностью амазонита и видимой флюорит-редкоземельной минерализацией заслуживают оценки на глубину, т. к. подобно изученной Плоскогорской модели могут представлять собой апикальные выклинивания круп-

ных пегматоидных тел, продуктивных на иттриевые лантаноиды, тантал с ниобием и другие промышленно-ценные компоненты, характерные для разведанных месторождений щелочных гранитов в России и за рубежом.

Очевидно, что невостребованные, но обогащенные иттрием месторождения коренных и россыпных руд Кольского региона и соседней Карелии, где возможно обнаружение и Sc-Y-х гранатов, могут служить объектами сезонной отработки малыми горно-технологическими предприятиями (МГТП) в модульном и мобильном исполнении. Геохимическая ревизия подобных проявлений на площадях развития кор выветривания может привести к обнаружению месторождений «ионных» иттриевоземельных руд, которые до сих пор не служили объектами поисков в регионах Северо-Запада. Кроме того, многие минералы-концентраторы иттриевых лантаноидов в редкоземельных пегматитах обладают способностью избирательного обогащения теми или иными индивидуальными и наиболее дефицитными редкоземельными элементами: ксенотим, ортит, фергусонит – иттрием, эвксенит и эшинит – неодимом, самарскит – гадолинием, гадолинит – иттербием и т. д. Как правило, в советское время и, тем более, в 90-х годы подобные месторождения оценивались как рудопроявления и служили преимущественно объектами минералогических исследований. Тем более, что последние сопровождалась ореолом информации об их повышенной, но так и не оцененной должным образом радиоактивности [17]. Результаты наших исследований месторождений керамических и слюдяных пегматитов, эксплуатировавшихся в Карелии и Кольском регионе, свидетельствуют о локальной (гнездовой) обогащенности первых из них ортитом и вторых – монацитом в отдельных жилах. В частности, скопления монацита в эндоконтакте одной из жил в процессе добычи слюды – мусковита на месторождении Малиновья варака в Карелии послужили причиной импульсного радиоактивного облучения горняков при взрывах повышенной мощности на эксплуатационном горизонте. На Енском месторождении слюды – мусковита в Кольском регионе подобные же скопления монацита в обрамлении кварцевых ядер обусловили повышенную радиоактивность – до 800–1200 мкр/час, которая была установлена нами при проведении радиометрического обследования разрабатываемых

пегматитов. Наконец, скопления крупнокристаллического ортита в одной из жил Чалмозерского месторождения керамических пегматитов обнаружили повышенную радиоактивность в 140 мкр/час. Следовательно, использование радиометрии может служить экспресс-методом при рекогносцировочном обследовании нерудных пегматитовых объектов в целях выявления практически интересных минеральных концентраций РЗМ в условиях плохой обнаженности.

Российский монацит в ожидании промышленного использования:

цериевые лантаноиды и проблема тория

В зарубежном мире монацит является вторым после бастнезита традиционным источником РЗМ преимущественно с цериевой специализацией. Его добыча осуществляется из прибрежно-морских россыпных ильменит-рутил-циркониевых месторождений в качестве попутного компонента (Индия, Малайзия, Таиланд, Шри-Ланка, Бразилия, Австралия, ЮАР и др.). Принято различать иттрий-цериевоземельные и иттриевоземельные монациты; последние как правило сопровождаются собственно иттриевым ксенотимом. В россыпях согласно [20], распространены 2 типа монацитов: кристаллический монацит из гранитов (желтый прозрачный), обогащенный лантаном и иттрием (1,58 % Y_2O_3), торием (7,15 % ThO_2) и ураном (0,2 % U_3O_8), т. е. максимально радиоактивный, и оолитовый Еи-монацит (серый непрозрачный) из осадочных пород, связанных с корами выветривания карбонатитов, обогащенный Nd, Eu, иногда Sc и менее радиоактивный (0,81 % ThO_2 и 0,00 % U_3O_8). До сих пор в производстве РЗМ из монацита лидером остается Индия (наряду с Китаем), где запасы наиболее крупного месторождения Манавалакуручи составляют 1,425 млн. т (при содержании 0,4 % Y_2O_3). В 2007 г. согласно оценкам Геологической службы США производство оксидов РЗМ в монацитовых концентратах составляло: в Индии – 2700 т, в Бразилии – 730 т, в Малайзии – 200 т (включая ксенотим). Ксенотим-монацитовые концентраты преимущественно добываются из оловорудных аллювиальных россыпей (Малайзия, Таиланд, Бразилия и др.). В частности, с россыпями Питинги в Бразилии связаны запасы 10 тыс. т оксида иттрия.

Примечательно, что в Индии запрещен экспорт монацита из-за его радиоактивности. Его

добыча осуществляется 2-мя компаниями, а переработка ведется одной из них – Indian Rare Earths Ltd (IRE) с выпуском хлоридов РЗМ и гидроксида тория. Годовое производство конечной продукции из 5 тыс. т хлоридов составляет 120 т фторидов РЗМ, 50 т коллективных оксидов, 30 т гидрата церия, 40 т цериевого полирита и некоторое количество индивидуальных РЗМ. До 90 % конечной дезактивированной редкоземельной продукции экспортируется.

Цены на монацитовый концентрат на мировом рынке в период 2005–2007 гг. составляли 540 долл/т и оставались стабильными.

Необходимо заметить, что одновременно с уменьшением в последние годы объемов мирового экспорта монацита из-за его радиоактивности в ряде стран интенсифицировались геологоразведочные работы на новых месторождениях. Среди них выделяются богатыми содержаниями РЗМ, прежде всего, иттриевоземельных коры выветривания карбонатитов Маунт-Уэлд в Австралии с запасами монацита около 770 тыс. т при высоких содержаниях Y_2O_3 и сопутствующими редкими металлами (Ta, Nb, Zr и др.). Другие крупные разведываемые источники иттриевоземельных металлов представлены известными с 80-х годов месторождениями колумбит-пироксеновой щелочногранитной формации в Канаде, Австралии, Саудовской Аравии, а также в нашей стране (Катугин в Читинской обл., Улуг-Танзек в ЮВ Тыве и др.). Несмотря на обнаружение в них таких промышленно-ценных минералов, обогащенных иттрием и иттриевыми лантаноидами, как гагаринит, иттрофлюорит, монацит, гадолинит и др., эти месторождения нигде в мире пока не осваиваются по совокупности причин, в том числе – в связи с затруднениями при их обогащении, повышенной радиоактивности и т. д. В то же время промышленное использование монацитовых концентратов с получением цериевых и сопутствующих иттриевых лантаноидов осуществляется в США и Китае, обеспеченных собственным бастнезитовым и «ионно-сорбционным» редкоземельным сырьем.

В России к настоящему времени известны 3 главных вида монацитового сырья [6, 2, 3]: 1) складированный монацитовый концентрат Госрезерва в объеме 83 тыс. т вблизи г. Красноуфимском в Свердловской области; 2) техногенное месторождение монацита в отходах отработки Куларского золоторудного россыпного месторождения в Усть-Янском районе Республики

Саха-Якутия с запасами в 40 тыс. т и в комплексе со 102 т золота; 3) суперкрупное Томторское месторождение высококомплексного железорудно-алюмофосфатно-редкометалльного сырья с пироксеном и монацитом с разведанными и утвержденными запасами богатых руд на первоочередном уч. Буранном в Анабарском районе Саха-Якутии. В указанной последовательности эти техногенные и природные месторождения рассматриваются в настоящее время как объекты промышленного освоения с учетом их преимуществ и рисков, включая радиационную безопасность.

Монацитовые концентраты Красноуфимска были экспортированы и складированы в период создания в СССР ядерного оружия. В настоящее время они оцениваются как подготовленное к глубокой химической переработке фосфатно-ториево-редкоземельное сырье, содержащее 22,2 % оксида фосфора, 5,5 % оксида тория (при 0,2 % урана) и 54 % суммы оксидов РЗМ. Суммарная радиоактивность монацитовых концентратов – 7800 Ки. Очевидно, что аномально высокая радиоактивность этого монацита и ее ториевая природа представляют собой форсмажорные обстоятельства, препятствующие ускоренному вовлечению готового к переработке и богатого редкоземельного сырья в промышленное использование в объеме 5 тыс. т в год. Очевидно, что ценное и, в то же время, радиационно опасное сырье может удовлетворить текущие и перспективные потребности «Росатома» в РЗМ в течение ближайших 10 лет. Задача попутного извлечения тория технологически также решается на предприятиях этой госкорпорации: радиохимическая ториевая продукция может складировать в качестве Госрезерва до начала реализации ториевого энергетического проекта. Тем более, что Индия и Норвегия на собственном торийсодержащем сырье уже начали разработки по реализации подобных проектов.

Для монацита или куларита россыпного месторождения золота характерны содержания тория (1,1 %), в пять раз меньшие, чем в красноуфимском. В то же время он характеризуется повышенными концентрациями средних и тяжелых иттриевых лантаноидов и иттрия (0,64 %). Гравитационная схема обогащения хвостов ГОКа, разработанная НВП «Центр-ЭСТАГео» еще в 90-х годах, позволяет получать 95–96 %-й куларитовый концентрат. Гидрометаллургическая схема вскрытия и глубокой переработки

куларита позволяет получать раствор нитратов РЗМ и затем – их товарный карбонатный продукт с удалением редких земель по линии «неодим – самарий». Лицензия на добычу 4 тыс. т куларита и более 0,5 т золота была оформлена Межрегиональным НТК «Труд», а получение концентрата должно было осуществляться СП ООО «Кулар» при соучредительстве ООО «Сахаолово» и АГГК «Заполяная» [6].

Минерально-химическое сырье Томторского супергиганта как уникальный источник РЗМ, иттрия и редких металлов в перспективе на 100 лет: техноэкология и радиозэкология

Радикальное решение проблемы обеспечения российского ОПК и гражданских отраслей промышленного производства редкоземельными металлами представляется возможным в ближайшие 10–15 лет за счет рекомендуемого промышленного освоения суперкрупного Томторского месторождения высококомплексного и богатого железисто-алюмофосфатно-редкометалльного сырья, расположенного на СЗ Республики Саха-Якутии [2, 3].

Параметрами редкометалльных и сопутствующих им ресурсов Томтор превосходит месторождение Араша в Бразилии, освоение которого за счет прямых зарубежных инвестиций позволило монополизировать мировой рынок феррониобия и ниобия. Однако, в отличие от Араша, руды Томтора, не имеющие аналогов в России и за рубежом, представляют собой остаточный продукт естественного обогащения минералами тяжелой фракции коры выветривания карбонатов в результате ее перемыва и переотложения, т. е. фактически коллективный природный концентрат. В результате он аномально обогащен пироксеном, минералами-концентраторами железа, РЗМ с преобладанием элементов наиболее дефицитной среднетяжелой группы и иттрия, а также скандия, алюмофосфатов и других особо ценных компонентов. Все это открывает возможности и перспективы получения феррониобия, необходимого, прежде всего, для производства труб большого диаметра, фосфатного сырья и удобрений в объемах, сопоставимых с хибинскими, и, наконец, для возрождения и организации производств РЗМ, иттрия, скандия и другой высоколиквидной продукции. Перспективность его поэтапного освоения обеспечивается не только уникальностью сырья, но и возможностями использования это-

го месторождения в качестве эпицентра нового горно-химико-металлургического кластера в Заполярье, подобного Кольскому и Норильскому. Эти возможности обосновываются с инновационных ресурсно-технологических, энергетических и логистических позиций [3].

Природный полиминеральный концентрат (руда) Томтора превосходит мономинеральный лопаритовый Ловозера по содержаниям иттриевых лантаноидов в несколько раз, в том числе по Eu – в 7 раз, Er – в 15 раз и особенно иттрию – почти в 150 раз, а хибинский апатит – по Tb, Yb, Lu и иттрию (в 1,5 раза). Содержания в нем тория (1500 г/т) и урана (200 г/т) значительно меньше, чем в лопарите и особенно – в красноуфимском монаците (см. табл. 7). Более высокая потенциальная товарная ценность томторского сырья как в минеральных формах, так и в химических сомнений не вызывает. Однако, эти же факторы – полиминеральность и поликомпонентность – обуславливают и значительные технико-эколого-экономические риски и издержки организации перерабатывающих высококомплексных производств. Об этом свидетельствуют, прежде всего, неоднозначные результаты технологических исследований томторских богатых и рядовых руд в качестве редкометального и редкоземельного сырья с сопутствующим алюмофосфатным, выполненные на весьма различном исходном материале в период длительной подготовки подсчета запасов на уч. Буранном (с утверждением в качестве балансовых 8 % от разведанных). Специфика руд коры выветривания, даже переотложенных, исключает полноценное использование для их обогащения традиционных физико-механических методов. В то же время задача получения максимально возможного комплекса селективных продуктов из руд Томтора требует разработки единой каскадной обогатительно-перерабатывающей схемы, включающей комбинирование пирохимических, кислотных и экстракционно-сорбционных физико-химических методов.

Все они, так же как и традиционные обогатительные методы, должны базироваться на материалах малообъемного минералогеохимического картирования коровых руд, результаты которого включают составление для каждого из них поминеральных балансов распределения полезных и лимитируемых компонентов и микрокомпонентов. На этой объективной информационной основе могут быть со-

ставлены представительные групповые пробы для проведения технологических испытаний. К сожалению, пока данные об уровнях концентрации и распределение радиоактивных элементов в томторских рудах не доступны для какого-либо анализа, включая их поведение в разработанных схемах кислотной переработки сырья. В значительной мере это касается и естественных корреляционных связей между главными рудообразующими компонентами – Fe, Si, Ca, P и др. **редкими металлами и радиоактивными элементами**, анионными компонентами и т. д. Такая информация имеет принципиальное значение для выбора способов разделения и селективного выделения основных компонентных групп исходного сырья, что облегчает задачи извлечения ценных и лимитируемых микрокомпонентов.

С этих позиций нами предусматривается пирохимическая переработка томторской руды с применением усовершенствованной для монопродуктовой ниобиевой руды Араша комбинированной схемы, завершаемой ликвационной алюмотермической плавкой флюсованного пирохлорового концентрата с получением феррониобия и удалением в составе шлака радионуклидов. В то же время рассматривается авторский вариант использования ликвационной плавки, эффективность которой ранее была установлена применительно к фосфатно-ниобиевым корам выветривания карбонатитов Белозимского и Новополтавского месторождений. Применительно к томторскому поликомпонентному природному концентрату предусматривается короткая 2-хстадийная схема его пирохимического обогащения с получением ведущих продуктов: сначала плавка осуществляется в окислительной среде с получением не смешивающихся железисто-редкометалльного и карбонатно-фосфатного слоев (плавленных промпродуктов), а затем – в восстановительных условиях с получением из первого ферросплава, а из второго – фосфатного продукта [2, 3].

При этом очевидно, что фосфатный продукт ликвационной плавки будет содержать все компоненты исходных минералов-концентраторов фосфора: крандаллита (кальциевого фосфата алюминия), 3-х алюмофосфатов – стронция (гояцита), бария (горсейксита) и редких земель (флоренсита), а также монацита. Тем самым определяются возможности последующего извлечения из полученного плавленого фосфатно-

го концентрата всех сопутствующих компонентов, изоморфных с кальцием, как особо ценных, так и токсичных, включая радионуклиды. Для извлечения из исходного сырья, ниобиевых и фосфатных промпродуктов широко комплекса сопутствующих редких и редкоземельных металлов – Sc, Y, Eu, Sm, Nd, Pr и других, а также тория и урана могут быть использованы отечественные методы, включающие автоклавное вскрытие щелочным раствором, хлоридно-кислотное выщелачивание, электролиз, сорбционно-экстракционные способы и т. д.

Сравнительно с Ловозерским месторождением Томтор обладает целым рядом преимуществ, которые необходимо учитывать на инновационном этапе освоения северных территорий и, тем более, объектов стратегического значения: 1) возможностями открытой добычи сырья вместо подземной; 2) его дезинтегрированным состоянием и обогащенностью высоколиквидными полезными компонентами (руды как природные концентраты); 3) возможностями прямых переделов на месте с применением ликвационной плавки и получением сплава FeNb, фосфатного продукта, выделения иттриевых лантаноидов, иттрия, скандия; 4) более низкими содержаниями в сырье лимитируемых с технологических и экологических позиций компонентов – естественных радионуклидов, фтора и других.

Соответственно, государственные и частные инициативы, необходимые для организации государственно-частного партнерства при освоении Томтора и его инфраструктурного обеспечения, должны предусматривать привлечение отечественных и зарубежных соинвесторов, заинтересованных в производстве и реализации высоколиквидной продукции востребованного профиля (Япония, Корея, Канада, и др.).

Комплексное освоение Томтора, превосходящего по ресурсам, качеству и разнообразию минерального сырья зарубежные аналоги (Араша в Бразилии и др.), может сыграть роль «спускового механизма» в создании на СЗ Саха-Якутии нового горно-химико-металлургического комплекса, подобного Кольскому или Норильскому [3].

Своевременное и оперативное освоение Томторского месторождения предусматривает перевод его из разряда пассивного государственного резерва в активный за счет создания складированных и легкодоступных запасов ми-

неральных концентратов и конечной химико-металлургической продукции стратегического значения, т. е. в соответствии с современной зарубежной практикой.

Радиационно-экологические риски в обращении с редкометалльно- редкоземельным сырьем, их профилактика и организационные решения

Приведенные данные о результатах изучения, возможностях и перспективах промышленного использования в нашей стране различных сырьевых источников РЗМ свидетельствуют о необходимости их комплексной минералогическо-геохимической и техноэкологической оценки методами детального малообъемного картирования с ранних стадий ГРП, в процессе разведки – на групповых пробах, представляющих различные типы руд, и в период эксплуатации – с использованием возможностей составления балансов распределения полезных и лимитируемых компонентов в материальных потоках производства, включая процессы обогащения, переделов и образования соответствующих отходов. Наиболее эффективным представляется последовательное и сочетанное использование методов *техногеохимии, технологической минералогии и техноэкологии*, что позволяет осуществлять паспортизацию уровней концентрации и распределения как редких металлов и РЗМ, так и радиоактивных элементов в реально извлекаемых минеральных формах. Тем самым, с одной стороны, создаются условия для радиационно-экологического мониторинга при добыче, обогащении и переделах различных видов редкометалльно-редкоземельного сырья, с другой – прогнозирования технологических возможностей и разработок инновационных способов и комбинированных схем извлечения РЗМ и других полезных компонентов с одновременным устранением лимитируемых, включая дезактивацию конечной химико-металлургической продукции и отходов производства.

К сожалению, в советское время в процессе разведки и даже эксплуатации месторождений, представляющих интерес в качестве источника РЗМ, вопросам их оценки на индивидуальные элементы и, тем более, на торий и уран, не уделялось должного внимания. Только в начале 90-х годов Мингео СССР разослало директивное письмо о необходимости оценки разведываемых и эксплуатируемых редкометалльных ме-

сторождений, включая Ловозеро. Отсутствие систематизированной информации о содержаниях урана и тория в рудах и минеральных концентратах, а также в отходах их переработки характерно, в частности, для энциклопедического издания в 6-ти томах «Экологической геохимии элементов» [20]. Выполненные нами комплексные минералого-геохимические исследования на вышеуказанных месторождениях Кольского региона и Карелии, включавшие радиогеохимические разделы, в известной степени позволили восполнить упущенную геологоразведкой информацию и, главное, разработать методику выполнения подобных НИР, актуальность которых сохраняется и в настоящее время. При этом результаты радиогеохимических оценок и конкретные рекомендации были непосредственно использованы Ловозерским и Ковдорским ГО-Ками, ПО «Апатит», «Ковдорслюда» и «Карелслюда» как непосредственными заказчиками догоровных работ.

На Ловозерском ГОКе Минцветмет СССР была разработана эффективная система мониторинга за рациональной безопасностью добычи, обогащения и транспортировки лопаритового концентрата. Во-первых, в забое участковым геологом с помощью радиометра не только контролировались уровни естественной радиоактивности руды, но и оконтуривались мелом маломощные прослои лопарита в уртиках, которые визуально почти не различались. Во-вторых, на дневной поверхности геофизиками, была создана установка, позволявшая в автоматическом режиме производить отбраковку вагонеток с рудой: в случае превышения допустимого уровня радиоактивности руда направлялась в отвал. Тем самым соблюдался режим радиационной безопасности на обогатительной фабрике. Полученный лопаритовый концентрат затаривался в контейнеры со свинцовой защитой и транспортировался по железной дороге в Соликамск на переработку. В то же время более жесткие требования обеспечения радиоэкологической безопасности по торью сравнительно с ураном (трехкратные) обусловили выполнение нами по договору с ЛГОКом договорной работы, в результате которой были составлены полиминеральные балансы распределения каждого из них по выделенным типам руд, включая подготавливаемые к эксплуатации апатито-лопаритовые и лопарит-эвдиалитовые. На рудниках, эксплуатирующих месторождения нерудного пегмати-

тового сырья, наши рекомендации о необходимости проведения их радиометрического обследования с минералого-геохимической заверкой выявленных аномалий и оценкой их на уран и торий также были приняты. В результате был организован соответствующий контроль участковыми геологами за радиационной безопасностью добываемого сырья.

В промышленности для дезактивации химической редкоземельной продукции экстракционными методами традиционно используется 100 %-й трибутилфосфат (ТБФ), который экстрагирует торий более интенсивно, чем РЗМ. Вскрытие исходных редкоземельных концентратов, помимо промышленной хлоридной технологии «СМЗ», может осуществляться, согласно разработкам специалистов [21–25] азотно-кислотными методами или автоклавным щелочным с последующим растворением осадка гидрооксидов РЗМ и тория азотной кислотой. В настоящее время впервые апробированная в конце 70-х годов ОАО «ВНИИХТ» на Кирово-Чепецком химкомбинате азотно-кислотная технология экстракционного получения концентрата РЗМ внедряется на заводе ОАО «Акрон» в целях извлечения из апатита – до 200–400 т/год **La, Ce, Nd, Pr и концентрата среднетяжелой группы**. При очистке продуктивного азотно-кислого раствора РЗМ от тория используется его способность экстрагироваться ТБФ лучше, чем РЗМ. Новая технологическая схема ВНИИХТ, разработанная для переработки монацита, предусматривает последовательное осаждение из продуктивного раствора радия на BaSO_4 с последующим захоронением, затем экстракционное извлечение урана с ТБФ и осаждение его NH_4OH с выделением диураната аммония и наконец, экстракционное отделение тория от РЗМ из реэкстракта с применением ТБФ и осаждением его в виде оксалата и оксида, а РЗМ – в виде карбонатов.

Экстракционное разделение на группы индивидуальных РЗМ, согласно [25], осуществляется в системе 100 % ТБФ – упаренный раствор нитратов РЗМ с концентрацией до 400 г/л. Разделение осуществляется между Sm и Nd, легкие РЗМ остаются в рафинате, иттриевая группа – в реэкстракте. Разделение РЗМ иттриевой подгруппы производят в системе: ТБФ – нитратная соль четверть аммонийного основания (ЧАО) – разбавитель – концентрированный раствор нитратов РЗМ (200 г/г). При этом в экстракт переходят

средние РЗМ, а иттрий и тяжелые РЗМ остаются в рафинате [25].

Среди возможных вариантов захоронения торийсодержащих отходов в качестве наиболее безопасного рекомендовано выделение, концентрирование и захоронение тория в виде осадка гидроксокарбонатов с удельной альфа-активностью менее $1 \cdot 10^{-3}$ Ку/кг, как отходов средней группы активности. При необходимости возможно получение ThO_2 прокалкой гидроксокарбоната тория. Транспортировка гидроксокарбоната тория должна осуществляться в запаянных пластиковых мешках, помещенных в металлические оборотные контейнеры. Рафинат и промывные растворы от отмывки осадка заправляются на подземное захоронение. При появлении потребности в ториевой продукции следует предусмотреть получение ThO_2 прокалкой гидроксокарбоната тория [25].

Приведенные технологические схемы получения и дезактивации редкоземельной продукции из апатитовых и монацитовых концентратов представляются актуальными в связи с отсутствием в настоящее время возможностей селективного получения групп индивидуальных цериевых лантаноидов, иттриевых лантаноидов и иттрия на действующем производстве хлоридов и карбонатов РЗМ в Соликамске; в то время как возможности завода в г. Глазове ограничены крайне малыми объемами.

В заключении необходимо отметить, что за время проведения 3-х конференций (2011–2013 гг.), посвященных проблеме возрождения в России производств РЗМ, каких-либо организационно-производственных сдвигов в ее решении не про-

изошло. Структурная организация в госкорпорации «Росатом», специализация которой, казалось бы, предусматривает возможности незамедлительного и первоочередного вовлечения в промышленное использование складированного в качестве Госрезерва красноуфимского монацита, остается недоступной для специалистов, имеющих опыт изучения и оценки ведущих редкометалльно-редкоземельных месторождений страны и ближнего зарубежья. Возникает вопрос о критериях выбора первоочередных сырьевых источников РЗМ? Как минимум его решение требует составления сравнительных ТЭР и ТЭО, причем последнего – специализированной проектной организацией при участии в качестве экспертов-советников непосредственных специалистов-редкометаллыщиков, а не чиновников от науки. Думается, что такая организация предпроектного этапа возрождения производств РЗМ, связанного с восстановлением и развитием производств редких металлов (Li, Cs, Ta, Nb, Be, Zr, Hf, Sc, Re, Ga, Ge и др.), может быть осуществлена в структуре госкорпорации «Ростехнологии» для удовлетворения потребностей в них как ОПК, так и всех остальных отраслей нашей промышленности в целях ее качественного развития.

Межведомственный характер редкометалльно-редкоземельной проблемы в нашей стране, с учетом очевидных кадровых потерь за последние 25 лет невострребованности редких металлов в нашей стране, ориентируют на создание соответствующего Координационного Совета и Рабочей группы при вице-премьере Правительства по оборонной промышленности и руководстве «Ростехнологии».

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелентьев Г. Б. Редкоземельный ресурс инновационного развития российских производств: состояние и перспективы В ж. Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, вып. 3 (119). М: ФГУП ВИМИ, 2013. С. 82–88.
2. Мелентьев Г. Б., Самонов А. Е. Зачем и кому нужен Томтор? Стратегия развития. Международн. химич. ж. Химия и Бизнес, № 2 (98), ч. 1, 2009. С. 17–21; №№ 3–4 (99–100), ч. 2, 2009. С. 49–54; №6 (102), ч. 3, 2009. С. 52–57.
3. Мелентьев Г. Б., Самонов А. Е., Толстов А. В. В ожидании промышленного освоения. Или почему Томтор открывает огромные выгоды инвесторам и государству? В международн. химич. ж. «Химия и Бизнес», № 5–6, октябрь 2013 г. С. 60–63.
4. Roskills Letters from Japan, 1993–2007.
5. [http: www. rasnoimport-moscow. ru/doc/1064564663. doc.](http://www.rasnoimport-moscow.ru/doc/1064564663.doc)
6. Мелентьев Г. Б., Самонов А. Е., Малинина Е. Н. Радиогеохимические и геотектонические аспекты изучения и радиозоологические оценки объектов недропользования и урбанизированных территорий. В ж. Экология промышленного производства. – М: ФГУП ВИМИ. вып. 3., ч. 1, 2010. С. 12–26; вып. 4., ч. 2, 2010. С. 2–15.
7. Николаев А. И., Петров В. Б., Мельник Н. А., Брыляков Ю. Е., Плешаков Ю. В., Федченко В. Ф. Исследование состава и радиационных характеристик сфенового концентрата из апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений. В сб. Материалы Международн. конф. «Комплексная переработка нетрадиционного и алюмосиликатного сырья. Современное состояние и перспективы», 4–8 апреля 2006 г.,

ИХТРЭМС КНЦ РАН, г. Апатиты. – Апатиты: КНЦ РАН, 2006. С. 200–205.

8. Мелентьев Г. Б., Самонов А. Е., Делицын Л. М., Ваньшин Ю. В., Зубков А. А. Современное состояние и перспективы утилизации, обезвреживания, комплексной переработки и использования фосфогипса. В сб. Материалы III Международной научной конференции «Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов», 25–27 сентября 2007 г., Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН. С. 117–120.

9. Самонов А. Е., Мелентьев Г. Б., Ваньшин Ю. В. Экологическое воздействие хранилищ фосфогипса и пиритных огарков на среду обитания и перспективы их комплексной переработки с получением высоколиквидной товарной продукции. В ж. Экология промышленного производства. М.: ФГУП ВИМИ, вып. 2, 2008. С. 65–76.

10. Самонов А. Е. Новые данные по минеральным формам редких металлов в фосфогипсовых отходах. ДАН, том 440, №2, 2011. С. 234–237.

11. Абрамов А. М., Соболев Ю. Б., Галиева Ж. Н., Галиев Р. С., Сабина О. Р. Комплексная технология переработки фосфогипса с получением концентрата РЗМ, гипсового вяжущего и строительных изделий на его основе. В сб. Материалы международн. конф. «Редкоземельные элементы: геология, химия, производство применение», 29–31 октября 2012 г., ОАО «ВНИИХТ» Росатом, Москва. М.: ВНИИХТ, 2012. С. 41–42.

12. Мелентьев Г. Б. Перспективы использования нерудного и редкометалльного сырья Кольского региона в производствах керамических и новых неорганических материалов. В ж.: Конструкции из композиционных материалов. № 1. М.: ФГУП ВИМИ, 2003. С. 11–32.

13. Аржаткина О. А., Елагин В. Я., Федорова Т. В. Щелочно-сернокислотная технология переработки лопаритового концентрата. В сб. тез. докл. Международн. симпозиума «Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке», 5–9 октября 1998 г., Москва. М.: ВИМС, 1998.

14. Гуткова Н. Н. Зона ловчорритовых и ринколитовых месторождений Хибинских тундр. V Хибинский сборник. Хибинские редкие элементы и пирротины. – Л.: Госхимиздат, 1933. С. 60–68.

15. Красоткин И. С., Лесков А. Л., Войтеховский Ю. Л., Шпаченко А. К. Бурное прошлое ущелья Гакмана. Труды V Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии. Апатиты: изд. Колльского научного центра РАН. 2008. С. 44–49.

16. Борнеман-Старынкевич И. Д. Химический состав ловчоррита и кондрикита. VI Хибинский вестник. Хибинские апатиты. Л.: НИС НКТП, 1933. С. 114–118.

17. Мелентьев Г. Б., Аргаматов И. Г., Лоскутова Л. М., Павлов Н. В., Марьянова Н. П. Распределение редких и радиоактивных элементов в апатитолопаритовых рудах Ловозера и перспективы вовлечения их в комплексное промышленное использование. Материалы международн. конф. «Комплексная переработка нетрадиционного титано-редкометалльного и алюмосиликатного сырья. Современное состояние и перспективы», 4–8 апреля 2006 г., Апатиты. – Апатиты: ИХТРЭМС КНЦ РАН, 2006. С. 189–196.

18. Мелентьев Г. Б. Фазовая несмешиваемость в расплавах как инновационный техноэкологический фактор экспрессной переработки природного и техногенного сырья. В сб. Материалы Всеросс. научн. конф. с международн. участием «Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов», 27–30 ноября 2010 г., ИХТРЭМС КНЦ РАН, Апатиты. – Апатиты, КНЦ РАН, 2010. С. 127–129.

19. Мелентьев Г. Б., Павлов Р. И., Трубин В. И., Совсуняк В. И., Шарый А. Б. Перспективы разработки комплекса геолого-геохимических методов локального прогнозирования, поисков и оценки пегматитовых месторождений высококачественного нерудного сырья. В сб. Геохимические методы поисков неметаллических полезных ископаемых. Под редакцией В. В. Иванова, Г. Б. Мелентьева. М.: ИМГРЭ, 1990. С. 196–200.

20. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов. Т. 6. М.: Экология, 1997. С. 607, (С. 108–109).

21. Березкина В. В., Михлин Е. Б., Никонов В. Н. и др. Изучение экстракционного процесса отделения РЗЭ от радиоактивных примесей. В сб. Научные труды ГИРЕДМЕТА. Т. ЛП, 1974. С. 27–33.

22. Карманников В. П., Клименко Н. А., Михлин Е. Б. и др. Экстракционная переработка растворов РЗМ, полученных из лопаритового концентрата. Сб. трудов IV научн. конф. «Развитие редкометалльной промышленности в России на базе лопарита». С.-Петербург, 2001. С. 113–114.

23. Косынкин В. Д., Макаров В. В., Шаталов В. В. Очистка редких земель лопарита от радиоактивных примесей. Сб. трудов IV научн. конф. «Развитие редкометалльной промышленности в России на базе лопарита». С.-Петербург, 2001. С. 153–158.

24. Лебедев В. Н. Выделение радионуклидов при переработке лопарита. В сб. Материалы Международн. конф. «Комплексная переработка нетрадиционного титано-редкометалльного и алюмосиликатного сырья. Состояние и перспективы», 4–8 апреля 2006 г., ИХТРЭМС КНЦ РАН, г. Апатиты. Апатиты: КНЦ РАН, 2006. С. 127–130.

25. Ануфриева А. В., Буйновский А. С., Гулюта М. А., Макасеев Ю. Н., Молоков И. Б., Софронов В. Л. Переработка РЗЭ-содержащих руд и концентратов. В сб. докл. Всеросс. конф. по редкоземельным металлам (РЗМ-2013), 20–21 апреля 2013 г., г. Томск. Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. С. 207–213.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД И РОССЫПЕЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Левченко Е. Н., Калиш Е. А.

ФГУП «ИМГРЭ», г. Москва, levchenko@imgre.ru

Общеизвестно, что рудоподготовка играет очень большую роль в технологии переработки минерального сырья. Для коренных руд от правильно подобранных методов рудоподготовки зависит степень раскрытия рудных минералов, количество шламовой фракции ($-0,044$ мм) и потери с ней ценных компонентов и, как следствие, выход и качество конечной товарной продукции. Использование нового, эффективного оборудования для рудоподготовки минерального сырья влияет не только на технологические показатели руд, но и на технико-экономические показатели освоения месторождений.

Затраты на операции рудоподготовки (дробление, измельчение, грохочение) составляют более 50 % в себестоимости переработки исходных руд.

В последние годы, для сокращения массы руды, поступающей на основные технологические операции, используются методы радиометрической сепарации и фотосепарации, которые основаны на контрастных свойствах рудных и породообразующих минералов и могут быть использованы как на борту карьера, так и после крупнукосового дробления.

Исследования по радиометрической сепарации руды с целью оценки принципиальных возможностей крупнукосовых методов обогащения целестинсодержащих известняковых руд проводились совместно с сотрудниками ФГУП «ВИМС». Для этого была специально отобрана на Верхнеуфьевской площади (Тульская обл.) Табольшого месторождения Тульско-Рязанской целестиновой провинции малообъемная проба массой 94,8 кг.

Комплекс исследований включал изучение основных свойств минерального сырья, которые характеризуют целесообразность обогащения его в крупнукосовом виде (гранулометрический состав руды, контрастность по содержанию стронция в кусках определенного класса крупности и соответствие интенсивности разделительного признака конкретного метода сепарации содержанию ценного компонента) и определение ожидаемых технологических показателей обогащения.

Грохочением руды на классы крупности: $-150+75$ мм, $-75+50$ мм, $-50+30$ мм, $-30+20$ мм и -20 мм установлено, что выход классов $+20$ мм очень высокий и составляет 95,3 % (табл. 1). Среди машинного материала руды, подвергаемого крупнукосовой сепарации ($+20$ мм), преобладают классы $+50$ мм. Кроме того, значительная масса руды приходится на наименее раскрытый материал $-150+75$ мм (33,5 %). Эти параметры совершенно не характерны для руды после ее крупного дробления. Особенно показательным является незначительный выход мелкого класса -20 мм (4,7 %), что в 10–20 раз меньше встречаемого на практике. Поэтому исследования носили поисковый характер и проведены только на классах $-150+50$ и $-50+30$ мм.

Таблица 1

Гранулометрический состав исходной пробы целестиновой руды

Класс крупности, мм	Выход, %		Содержание SrO, %	Извлечение, %	
	от класса $+20$ мм	от исходной руды		от класса $+20$ мм	от исходной руды
$-150+75$	35,1	33,5	16,90	69,3	65,5
$-75+50$	32,9	31,3			
$-50+30$	28,0	26,7	16,19	27,4	25,9
$-30+20$	4,0	3,8	13,59	3,3	3,1
$-20+0$	–	4,7	19,51	–	5,5
Исходная	–	100,0	16,71	–	100,0
в т. ч. $-150+20$	100,0	95,3	16,57	100,00	94,5

Разделительные признаки

Контрастность и эффективность фазового раскрытия. Руда изучаемой пробы целестиновой руды характеризуется низким значением показателя контрастности по стронцию: $M = 0,62$ на класс $-50+30$ мм и $M = 0,51$ на классе $-150+50$ мм, что характерно для руд с высоким содержанием ценного компонента. Для подобных руд неравномерность более объективно характеризуется показателем фазового раскрытия (Φ), при ко-

тором в кусках анализирует содержание целестина. Установлено также невысокое значение показателя раскрытия фаз руды $\Phi = 0,4-0,48$. Такая совокупность критериев М-Ф принципиально обуславливает удовлетворительную теоретическую обогатимость руды в крупнокусковом виде.

При разделении кусков непосредственно по содержанию в них SrO, т. е. этот элемент используется как разделительный признак, на классе $-50+30$ мм теоретический выход отвальных хвостов с содержанием 2,83 % SrO составляет около 30 % с небольшими потерями ценного компонента. Кроме того, при вариации содержания SrO в кусках от 0,47 до 48,7 % принципиально возможно получение богатого концентрата с содержанием 41,65 % SrO с выходом 8,11 %. На классе $-150+50$ мм показатели по хвостам и концентрату существенно ниже, соответственно, 16,4 и 1,5 %.

Эффективность разделительного признака крупнокусковых методов сепарации

Для оценки возможности реализации природной контрастности сырья с учетом его минерального состава исследованы следующие разделительные признаки (табл. 2):

- рентгенорадиометрический, основанный на возбуждении и регистрации вторичного характеристического излучения стронция (PPC сепарация),
- рентгенолюминесцентный, основанный на возбуждении и регистрации люминесценции присутствующего в руде кальцита (РЛС сепарация),
- различие кусков в плотности (метод обогащения в тяжелых суспензиях – ОТС).

По совокупности критериев Ξ_{Π} и E^T приоритетным является сухой метод PPC сепарации, поскольку задача удаления отвальных хвостов другими процессами не решается (для него характерно высокое значение $E^T_{\text{хв}} = 0,85$) и удовлетворительно выделяется богатый концентрат. Но задача получения богатого концентрата более эффективно реализуется с помощью ОТС, для чего граничная плотность разделения должна составлять 3,0 г/см³.

Основной причиной нарушения соответствия между интенсивностью разделительного признака и содержанием SrO в кусках для РЛС по хвостам и концентрату, а для ОТС по хвостам является наличие в руде значительного количества агрегатов целестина с карбонатами. Последние, представленные кальцитом и доломитом, обладают низкой плотностью и различной интенсивностью рентгеновской люминесценции.

Таблица 2

Разделительные признаки эффективности крупнокусковых методов сепарации

Наименование параметров	Методы разделения		
	ОТС	РЛС	PPC
Показатель процесса П	0,59	0,20	0,57
Эффективность признака разделения Ξ_{Π}	0,95	0,32	0,92
Эффективность качественного разделения E^T :			
– концентрат	0,84	0,0	0,61
– хвосты	0,0	0,0	0,85
Принято содержание SrO, %:			
– концентрат	41,0	41,0	41,0
– хвосты	2,8	2,8	2,8

Технологические показатели крупнокускового обогащения (рентгенорадиометрической сепарации)

Применение PPC сепарации позволяет удалить из руды кусковые хвосты с отвальным содержанием ценного компонента около 4 % SrO при выходе 28,4 % на классе $-50+30$ мм и 19,2 % на более крупном классе. Потери стронция с хвостами не превышают 7 % от класса. В пересчете на исходную руду ожидаемый выход хвостов составит около 20 % при извлечении в них SrO менее 5 %. При сепарации также возможно получение кондиционного концентрата, аналогичного по качеству для глубокого обогащения.

На основе результатов проведенных исследований сепарации подвергаются два класса крупности, на которых решается только задача удаления хвостов с содержанием SrO на уровне отвальных продуктов глубокого обогащения (табл. 3).

Применение кусковой радиометрической сепарации при обогащении рядовой руды принципиально позволит повысить в 1,2 раза качество сырья для последующей переработки за счет удаления 22,7 % отвальных хвостов (30,3 % от машинного класса) с содержанием 2,88 % SrO и потерях его всего 7 %. При этом соответственно сокращается объем рудного материала, подвергаемого тонкому гравитационно-флотационному обогащению.

Таким образом, проведенный комплекс поисковых исследований показывает, что усовершенствование схемы переработки сложных для обогащения стронциевых руд Табольского месторождения на основе включения процесса

крупнокусковой РРС сепарации технологически целесообразно.

Таблица 3

Прогнозные технологические показатели рентгенорадиометрической сепарации рядовой руды месторождения Табольшое

Наименование продукта	Выход, %		Содержание SrO, %	Извлечение SrO, %	
	от класса +20 мм	от исходной руды		от класса +20 мм	от исходной руды
Обогащенный продукт:	–	77,3	10,8	–	92,7
– п/п сепарации	69,7	52,3	11,3	90,0	65,5
– класс –20 мм (отсев)	–	25,0	9,80	–	27,2
Хвосты	30,3	22,7	2,88	10,0	7,3
Исходная руда, в т. ч.	–	100,0	9,0	–	100,0
класс –150+20 мм	100,0	75,0	8,7	100,0	72,8

Как показали предварительные исследования, для целестинсодержащих известняков характерно не только неравномерное распределение целестина, но и склонность к ошламованию. При дроблении и измельчении руды до полного раскрытия целестина (–0,14 мм) происходит образование большого количества (более 30 %) шламов, что отрицательно сказывается на дальнейших технологических операциях его обогащения.

Данные о распределении оксида стронция по классам крупности исходной руды после дробления (табл. 4) показывают, что его концентрации нет ни в одном классе и выделить продуктивный класс не представляется возможным. Выход шламового класса менее 0,044 мм составляет 32,58 % с распределением в него 32,95 % оксида стронция.

Для снижения шламообразования в процессе рудоподготовки было испытано новое дробильно-измельчительное оборудование.

Совместно с сотрудниками ООО «Новые технологии» (г. С-Петербург), было испытано принципиально новое дробильно-измельчительное оборудование.

Особенностями этого оборудования являются:

- способ разрушения исходного материала – ударный, при столкновении разогнанных до оптимальной скорости частиц с неподвижной преградой – корпусом,

- принцип разгона частиц – центробежный, путем ускорения и выбрасывания их из вращающегося с необходимой окружной скоростью ускорителя,

- интенсивный способ разрушения – незначительная продолжительность пребывания исходного материала в камере и снижение количества тонких классов,

- повышенная селективность раскрытия минералов вследствие разрушения частиц по ослабленным связям – спайкам, трещинам и т. д.,

- использование в комплексе с воздушным классификатором для возврата на домол частиц, имеющих крупность выше заданной.

Анализ гранулометрических характеристик материала технологической пробы до и после дробления и измельчения различными аппаратами до крупности – 1 мм (табл. 4) показал, что при измельчении исследуемого материала на центробежно-ударной мельнице МД-7, выход класса –0,044 мм составил 9,4 % от исходного продукта.

Таблица 4

Гранулометрическая характеристика материала пробы после дробления и измельчения различными аппаратами

Класс крупности, мм	Материал пробы после дробления и измельчения на штатном оборудовании			Материал пробы после измельчения в центробежно-ударной мельнице МД-7		
	Выход, %	Содержание SrO, %	Распределение SrO, %	Выход, %	Содержание SrO, %	Распределение SrO, %
+1	44,73	8,98	41,06	27,80	4,09	11,65
–1+0,56	4,46	9,75	4,45	16,80	6,28	10,81
–0,56+0,14	7,95	10,94	8,89	24,51	10,94	27,47
–0,14+0,044	10,28	13,6	14,29	20,59	19,03	40,15
–0,044	32,58	9,4	31,31	10,30	9,4	9,92
Всего проба	100,00	9,78	100,00	100,00	9,78	100

При выполнении операций дробления и измельчения на стандартных аппаратах (щековой дробилке, шаровой мельнице) общий выход шламов превышал 30 %. Изменилось распределение SrO по классам крупности с увеличением в классы –0,56+0,14 (с 8,89 до 27,47 %) и –0,14+0,044 мм (с 14,29 до 44,15 %) и уменьшением в класс –0,044 мм (с 31,31 до 9,92 %).

Сводные технологические показатели обогащения исходной руды по комбинированной схеме даны в табл. 5.

В результате переработки руды по комбинированной схеме получен целестиновый концентрат с выходом 24,97 % и извлечением 72 % SrO от исходной руды.

Сравнение технико-экономических показателей отработки Табольского месторождения по традиционной схеме гравитационно-магнитного обогащения добытой руды и по схеме с предварительной РРС добытой руды и последующим гравитационно-магнитным обогащением промпродукта РРС дало следующие результаты (табл. 6):

– при годовой производительности по добыче руды в 500 тыс. т предварительная РРС сокращает объем сырья, поступающего на глубокое обогащение на 113,5 тыс. т;

– годовые эксплуатационные затраты в целом по циклу обогащения сокращаются на 45,1 млн. руб. или на 11,3 %, что в 3,1 раза больше годовой стоимости потерь SrO с хвостами РРС;

– инвестиции в обогатительный комплекс сокращаются на 94,7 млн. руб. или 10 %;

Таким образом, использование предварительной РРС для целестиновых руд дает существенный экономический эффект.

Таблица 5

Технологические показатели обогащения исходной руды по комбинированной схеме

Наименование продукта	Выход, %		Содержание, %		Извлечение SrO, %	
	от обогащен. продукта РО	от исходн. руды	SrO	SrSO ₄	от обогащен. продукта РО	от исходной руды
Целестиновый концентрат	24,97	19,3	49,11	88,12	78,77	72,09
Пром. продукт гравитации	9,18	8,1	9,12	16,18	5,22	4,84
Хвосты:	65,85	73,6			17,01	23,07
– Хвосты РО	–	22,7	2,88	5,11	–	7,3
– Хвосты ГО	65,85	50,9	3,88	6,88	18,01	15,77
Исходная руда, в т. ч.	–	100,0	9,00	15,97	–	100,0
обогащенный продукт РО	100,0	77,3	10,8	19,16	100,0	92,7

Примечание: РО – радиометрическое обогащение, ГО – гравитационное обогащение.

Таблица 6

Экономическая эффективность применения РРС при обогащении целестиновых руд Табольского месторождения

Показатели	Ед. изм.	Гравитационно-магнитное обогащение добытой руды	Предварительная РРС добытой руды гравитационно-магнитное обогащение промпродукта РРС	Экономический эффект РРС
Годовая добыча руды	тыс. т	500	500	
Выход промпродукта РРС	%	–	77,3	
Годовые потери SrO с хвостами РРС	тыс. т		2,34	
То же в стоимостном выражении	млн. руб.		14,6	
Годовой объем руды/ промпродукта на обогащения	тыс. т	500	386,5	–113,5
Годовые эксплуатационные затраты на обогащение, всего	млн. руб.	398,7	353,6	–45,1
в т. ч. – РРС	млн. руб.	–	45,4	45,4
– гравитационно-магнитное обогащение	млн. руб.	398,7	308,2	–90,5
Инвестиции в обогатительный комплекс, всего	млн. руб.	1034,5	939,8	–94,7
в т. ч. – РРС	млн. руб.	–	100,2	100,2
– ОФ	млн. руб.	646,5	599,7	–46,8
– прочие (включая хвостохранилище)	млн. руб.	387,9	239,9	–148,0

Расчет экономической эффективности применения нового дробильно-сортировочного оборудования при обогащении целестиновых руд (или промпродукта РРС) в сравнении с использованием штатного оборудования на примере Табольского месторождения показал (табл. 7):

– за счет сокращения выхода шламов на 22,3 % и, соответственно, сокращения потерь стронция в них, извлечение стронция в продуктивные классы увеличилось с 68,7 % – по штатному оборудованию до 90,1 % – при использовании центробежно-ударной мельницы МД-7, т. е. в 1,3 раза;

– при годовой производительности по руде в 500 тыс. т дополнительно может быть получено 17,8 тыс. т целестинового концентрата на сумму 53,4 млн. руб.

Таблица 7

Экономическая эффективность применения различного дробильно-измельчительного оборудования при обогащении целестиновых руд Табольского месторождения

Показатели	Ед. изм.	Штатное оборудование	Центробежноударная мельница МД-7	Экономический эффект МД-7
Выход класса – 0,044 мм	%	32,6	10,3	–22,3
Потери SrO в классе – 0,044 мм	%	31,3	9,9	–21,4
Извлечение SrO в продуктивные классы	%	68,7	90,1	21,4
Годовое количество товарной продукции:				
– целестинового к-та	тыс. т	59,4	77,2	17,8
– то же в пересчете на SrO	тыс. т	29,2	38,0	8,8
Годовая стоимость товарной продукции	млн. руб.	178,1	231,5	53,4

Следовательно, использование нового дробильно-сортировочного оборудования, позволяющего значительно снизить выход шламов, резко повышает экономическую эффективность освоения целестиновых руд.

Инвестиционная непривлекательность россыпей титана и циркония, широко распространенного на территории России сырья, основная потребность в которых до сих пор обеспечивается за счет импорта, определяется следующими факторами: большая глубина залегания рудных песков, высокая доля тонкозернистости, высокая себестоимость переработки при дефиците, например, воды.

Новые способы рудоподготовки россыпных руд рассмотрим на примере титан-циркониевых песков Северо-Кавказской россыпной провинции, для объектов которой одной из причин не освоения является ограниченность водоснабжения.

Исследования проведены на двух укрупнено-лабораторных пробах, отобранных на объектах, которые отличались по содержанию суммы рудных (ильменита, рутила, циркона) минералов – 84,7 кг/м³ и 54,79 кг/м³ (табл. 8).

В настоящее время наиболее распространенным способом переработки месторождений циркон-ильменитовых песков является «мокрая» технология, в которой используются дезинтеграторы, гравитационные аппараты, магнитные и электрические сепараторы, сгустителя и фильтры, сушильные барабаны.

Гравитационные методы обогащения (винтовые, струйные и конусные сепараторы, концентрационные столы) предполагают использование воды. В свою очередь, применение

воды в обогатительном процессе требует создание системы оборотного водоснабжения, которая, как правило, оказывает существенное воздействие на окружающую среду. Сама система водоснабжения содержит и потребляет значительное количество воды (с учетом потерь). Сброс шламов и хвостов обогащения, осветление оборотных вод и прочее требует использование значительных площадей под шламохранилища, очистные сооружения и отстойники.

Таблица 8

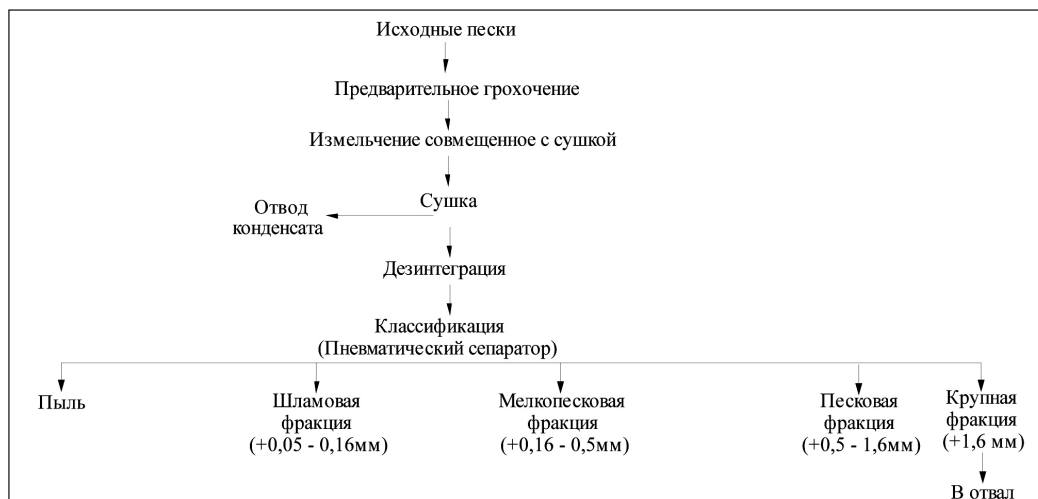
Сводные результаты полного количественного минералогического анализа классов крупности и исходных песков технологических проб

Минерал	проба КТ-1		проба ЕТ-1	
	%	кг/м ³	%	кг/м ³
Ильменит +изм. ильм	4,15	70,47	2,02	34,30
Лейкоксен	0,18	3,11	0,30	5,18
Рутил + псевдорутит	0,38	6,69	0,5	8,40
Циркон + циркон метам.	0,63	10,78	0,41	6,33
Глауконит	0,88	14,98	–	–
Кварц	56,57	961,74	89,902	1528,34
Полевые шпаты	30,07	511,19	2,696	45,83
Σ титановых минералов	4,743	80,63	2,851	48,46
Σ рудных минералов	5,377	91,41	3,223	54,79

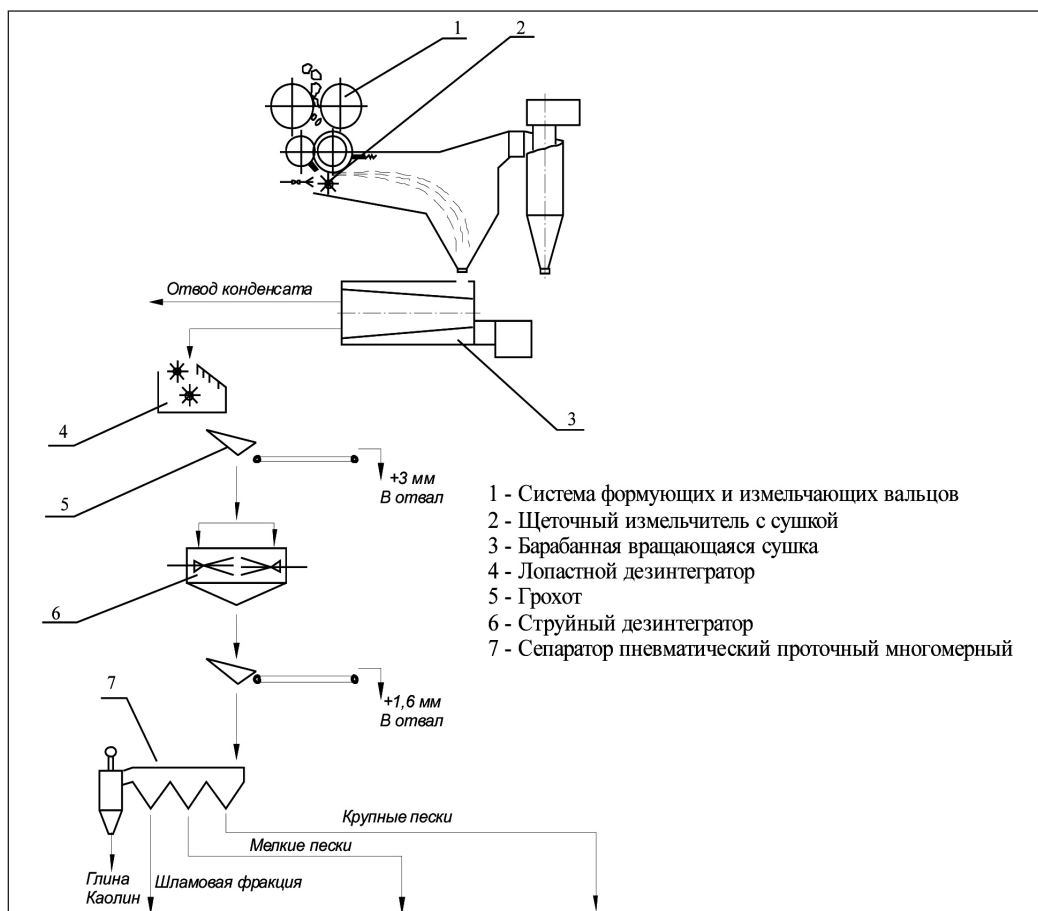
Наличие оборотного водоснабжения предполагает значительные потребления воды из чистых источников, отвод площадей земли под шламохранилища и технологические потери воды, влияющие на гидрогеологию и экологию региона.

Совместно с сотрудниками ООО «НПП «ИНЖИНИРИНГ» (Украина) были исследованы новые технологические и конструктивные решения сухой рудоподготовки исходных песков, позволившие перевести влажные тонкозернистые пески в сухую сыпучую массу (рис. 1).

Исходное сырье подвергается измельчению и предварительной сушке на валково-щеточном измельчителе, где даже при значительной влажности и высоком содержании глинистой фракции, превращается в мелкодисперсную сыпучую массу.



А



Б

Рис. 1. Технологическая схема (А) и аппаратное обеспечение (Б) сухой рудоподготовки титано-циркониевых россыпей

Частицы сырья подсушиваются на поверхности и утрачивают способность к слипанию. Подготовленное сырье досушивается в барабанных сушилках с прямым нагревом. Дезинтеграция сухого сырья выполнена в газоструйных мельницах. Конструкцией дезинтегратора предусмотрено отделение тонких (менее 2 мкм) глинистых фракций от раскрытого сырья с последующим осаждением. Песковая и гравийная часть сырья весьма эффективно классифицируется по гравитационной крупности на высокочастотном вибрационном грохоте «Ultimate Screener™».

Анализ продуктов сухой рудоподготовки технологической пробы 1 показал высокую эффективность метода – выход продуктивного класса $-0,14+0,044$ мм вырос с одновременным ростом распределения в него рудных минералов.

Совместно с институтом «Уралмеханобр» проведены специализированные работы по технологической оценке возможности переработки рудных песков с использованием сухих методов обогащения. Предварительно были проведены исследования на обогатимость материала проб по традиционной «мокрой» технологии.

Главное отличие между схемами в том, что по техническим причинам, в сухой схеме отсутствует операция получения коллективного концентрата с использованием гравитационных методов. Основное обогащение построено на отличительных физических свойствах рудных минералов: наличие у ильменита магнитных свойств, которыми не обладает рутил, а у рутила – проводимости, которой не обладает циркон (рис. 2).

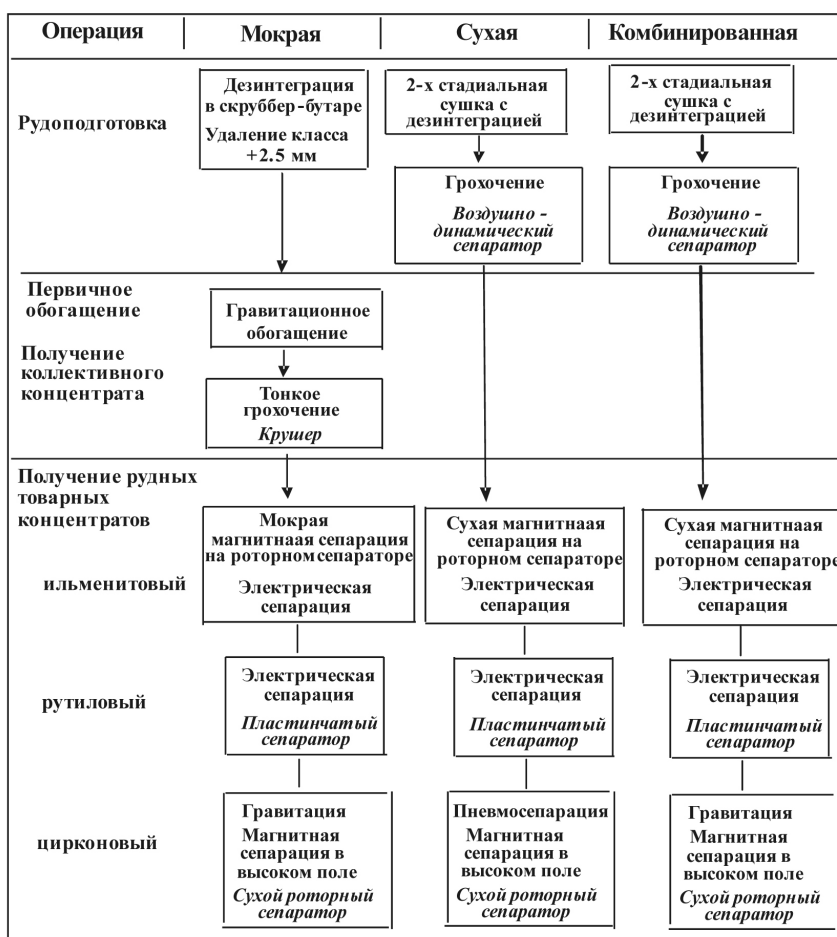


Рис. 2. Блок-диаграммы технологических схем переработки титано-циркониевых россыпей

В качестве первоначальной операции сухой обогащения после классификации исходных песков целесообразнее использовать электромагнитную сепарацию в сильном поле. Вся масса исходных песков после сушки, дезинтеграции

и классификации поступала на магнитную сепарацию для выделения ильменита и других минералов, обладающих магнитными свойствами. Из немагнитного продукта методом электрической сепарации выделялся рутил, а из непроводнико-

вой фракции пневмосепарацией (по плотности) выделялся циркон.

К новым успешно испытанным в ИМГРЭ на многих титан-циркониевых россыпях России, аппаратам относятся: высокоинтенсивный вибрационный грохот «Ultimate Screener™», роторные магнитные сепараторы с высокой индукцией поля, коронный электростатический сепаратор с вертикальным барабаном.

В процессе проведенных исследований по разработке методов сухой технологии показано, что рудные пески пробы 1 могут быть переработаны по безводной технологии с получением товарных рудных концентратов при высоком извлечении (не менее 88 %).

Применение «сухой» технологии позволило получить новый дефицитный и высоколиквидный товарный продукт – глауконитовый концентрат с выходом 6,5 % от исходного объема добытых песков.

Применение сухих комбинированных методов для обогащения песков пробы 2 позволяет на первом этапе выделить титансодержащие минералы в коллективный концентрат с последующей сухой доводкой.

Сухими методами обогащения без применения гравитационных методов выделение кондиционного цирконового концентрата проблематично, что связано с низким его содержанием в исходных песках. Изучена возможность обогащения материала пробы 2 по «комбинированной» схеме с получением цирконового концентрата на концентрационных столах, т. е. введением блока «мокрой» технологии. Применение концентрации на столе позволяет получить кондиционный цирконовый концентрат.

Применение «сухой» технологии для обогащения титан-циркониевых песков значительно повышает экономическую эффективность их отработки.

Проведенные сравнительные технико-экономические расчеты показателей эксплуатации при использовании традиционной «мокрой» технологии и по разрабатываемой «сухой» технологии, выполненные для рудных песков пробы 1 (табл. 9), показали, что:

- выходы рудных концентратов – ильменитового, рутилового и цирконового – по обеим технологиям практически равнозначны, среднее соотношение выходов по «мокрой» технологии к выходам по «сухой» составило 1:0,953. Соответственно в таком же соотношении находится и стоимость рудной товарной продукции;

- применение «сухой» технологии позволило получить новый дефицитный и высоколик-

видный товарный продукт – глауконитовый концентрат с выходом 6,5 % от исходного объема добытых песков. При минимальной цене на него в 200–250 долл., годовая стоимость глауконитового концентрата превышает годовую стоимость выпуска всех рудных концентратов. Кроме того, «сухая» технология позволила попутно получать высококачественный кварцевый концентрат, выход которого составляет около 10 %. В целом, дополнительный объем нерудных продуктов увеличивает суммарную годовую стоимость товарной продукции более чем в 2 раза;

- эксплуатационные затраты по обеим технологиям практически равноценны при среднем соотношении затрат по «мокрой» технологии к затратам по «сухой» – 1:1,025

- капитальные затраты на обогатительное оборудование по «сухой» технологии на 15 % ниже, чем при использовании «мокрой» технологии, что связано в основном со значительным сокращением вспомогательного оборудования;

- применение «сухой» технологии обогащения не требует сооружения хвостохранилища, что снижает капитальные вложения в обогатительный комплекс на 15–17 %.

- чистая годовая прибыль по «сухой» технологии увеличивается более, чем в 4 раза;

- внутренняя норма доходности (ВНД или IRR) составила по «мокрой» технологии 11,4 % при сроке возврата общих инвестиций около 10 лет, по «сухой» технологии ВНД увеличивается почти в 2 раза – до 22,9 %, а срок возврата инвестиций снижается до 3-х лет.

Сравнительные технико-экономические расчеты показателей эксплуатации при использовании на рудных песках пробы 2 «комбинированной» технологии обогащения, включающей элементы традиционной «мокрой» технологии и разработанной «сухой» (табл. 10), позволяют сделать следующие выводы:

- чистая годовая прибыль в 1,5 раза превышает эту величину по «мокрой» технологии; срок возврата общих инвестиций в освоение при использовании «комбинированной» технологии на 3 года ниже, чем при использовании «мокрой» технологии;

- применение «комбинированной» технологии позволило перевести достаточно бедные титан-циркониевые пески пробы 2 из категории низкорентабельных в категорию среднерентабельных (при ВНД 8,1 % и 11,5 %, соответственно).

Таблица 9

Сравнение ТЭП эффективности освоения россыпных итан-циркониевых песков по различным технологиям обогащения, проба 1

Наименование показателей	Ед. изм.	Варианты обогащения песков		Экономический эффект
		Традиционная «мокрая» технология	Разработанная «сухая» технология	
Годовая производительность по добыче, всего	тыс. т	2550	2550	
Годовой выпуск товарной продукции				
рудные концентраты цирконовый к-т	тыс. т	9,2	8,9	–0,3
рутиловый к-т	тыс. т	12,8	12,2	–0,6
ильменитовый к-т	тыс. т	58,7	53,6	–5,1
нерудные продукты строительные пески	тыс. т	510,0	510,0	0
стекольные пески	тыс. т	–	280,5	+280,5
глауконитовый продукт	тыс. т	–	165,8	+165,8
Годовая стоимость товарной продукции, всего	млн. руб.	1130,9	2082,7	+951,8
в т. ч. – рудные концентраты	млн. руб.	1028,9	983,7	–45,2
% рудных в общей стоимости	%	91,0	47,2	–42,8
– нерудные продукты	млн. руб.	102,0	1099,1	+997,1
% нерудных в общей стоимости	%	9,0	52,8	+41,8
Извлекаемая ценность 1 т песков	руб.	443,5	816,7	+373,2
Годовые издержки производства, всего	млн. руб.	779,9	786,6	+6,7
в т. ч. эксплуатационные затраты	млн. руб.	680,7	676,7	–4,0
Инвестиции в освоение, всего	млн. руб.	2684,3	2505,7	–178,6
Чистая прибыль в распоряжении предприятия	млн. руб.	238,8	998,1	+759,3
ВНД	%	11,4	22,7	+11,3

Таблица 10

Сравнение ТЭП эффективности освоения россыпных титан-циркониевых песков по различным технологиям обогащения, проба 2

Наименование показателей	Ед. изм.	Варианты обогащения		Экономический эффект
		Традиционная «мокрая» технология	Разработанная «комбинированная» технология	
Годовая производительность по добыче, всего	тыс. т	2550	2550	
Годовой выпуск товарной продукции				
рудные концентраты цирконовый конц-т	тыс. т	7,0	7,0	
рутиловый конц-т	тыс. т	12,2	10,2	–2,0
ильменитовый конц-т	тыс. т	53,6	49,9	–3,7
нерудные продукты строительные пески	тыс. т	1020,0	1020,0	
стекольные пески	тыс. т	–	280,5	+280,0
Годовая стоимость товарной продукции, всего	млн. руб.	1094,0	1190,9	+96,9
в т. ч. – рудные концентраты	млн. руб.	890,0	818,6	–71,4
% рудных в общей стоимости	%	81,4	68,7	–12,7
– нерудные продукты	млн. руб.	204,0	372,3	+168,3
% нерудных в общей стоимости	%	18,6	31,3	+12,7
Извлекаемая ценность 1 т песков	руб.	429,0	467,0	+38,0
Годовые издержки производства, всего	млн. руб.	779,2	764,8	–14,4
в т. ч. эксплуатационные затраты	млн. руб.	692,0	681,8	–10,2
Инвестиции в освоение, всего:	млн. руб.	2684,2	2738,4	+54,2
Чистая прибыль в распоряжении предприятия	млн. руб.	209,8	297,8	+88,0
ВНД	%	8,1	11,5	+3,4

Таким образом, применение «сухой» или «комбинированной» технологии обогащения титан-циркониевых песков, позволяет значительно повысить экономическую эффективность их освоения. В первую очередь за счет получения новых высоколиквидных видов нерудной товарной продукции, а также за счет уменьшения капитальных вложений в обоганительный комплекс.

Совместно с ФГУП ЦНИИГеолнеруд проведены специализированные работы по получению из россыпных редкометалльно-титановых песков попутных нерудных товарных продуктов.

Проведенные исследования показали, что нерудные составляющие редкометалльно-титановых россыпей представляют большой промышленный интерес. Они являются потенциальным сырьем для получения высоколиквидных и востребованных материалов и изделий для строительной, металлургической, стекольной и других отраслей промышленности. Проведены минералого-технологические исследования глауконита, как попутного товарного продукта многоцелевого назначения. Изучена возможность использования глауконитового продукта в качестве пигмента, сорбента и минерального удобрения пролонгированного действия.

Заключение

Переработка низкокачественных руд, а также зависимость эффективности обогащения от стабильности исходного питания обуславливают применение предварительной концентрации (сортировки, радиометрической сепарации и т. д.). Изучение возможности крупнокускового обогащения с разделением руды на технологические сорта должно стать обязательным элементом технологической оценки минерального сырья, и тем более сырья, использование кото-

рого в металлургическом производстве требует определенной подготовки, в том числе определенной крупности.

Предварительное разделение руды на сорта сокращает объем сырья, направляемого на обогащение, за счет выделения пустой породы (до 50 %) и продукта, пригодного к употреблению либо к дальнейшему химико-металлургическому переделу.

Применение предварительной концентрации рядовых и бедных руд в отдельных технологических циклах повышает экономическую эффективность производства, увеличивая суммарное извлечение ценных компонентов в товарную продукцию.

Разделение горной массы на природные сорта и генотипы на основе использования неравномерности оруденения в недрах открывает возможность создания принципиально новой системы информационной рудоподготовки.

Проведенный анализ новых способов рудоподготовки редкометалльных руд и россыпей на примере целестинсодержащих руд в карбонатных породах Табальского месторождения и титан-циркониевых россыпей Северо-Кавказской россыпной провинции, показал их положительное влияние на технологические показатели переработки и технико-экономические показатели освоения месторождений.

Использование новой технологии рудоподготовки и безводного обогащения россыпных руд позволяет, не только повысить экономическую эффективность освоения объектов, но, что очень важно, значительно снизить экологическое воздействие на окружающую среду. Все выше изложенные преимущества «сухой» технологии актуальны для Ставропольской россыпной провинции, т. к. для этого региона существует проблема с водными ресурсами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьева А. В., Левченко Е. Н. Стронциевое оруденение в карбонатных породах Верхнеуфьевской площади (Тульская обл.). М. Материалы годичной сессии МО Российского геологического общества «Минералогические исследования в решении геологических проблем. 2007. С. 121–124.
2. Кременецкий А. А., Левченко Е. Н., Усова Т. Ю. Роль технологии переработки минерального сырья на повышение эффективности ГРП и инвестиционной привлекательности редкометалльных объектов. // Разведка и охрана недр. 2004. № 11. С. 37–43.
3. Левченко Е. Н., Калиш Е. А., Тигунов Л. П., Ануфриева С. И. комбинированная переработка стронцийсодержащих руд – основа повышения их инвестиционной привлекательности. Апатиты. сб. тезисов Международного совещания «Современные методы комплексной переработки руд нетрадиционного минерального сырья. 2007. ч. 1. С. 103–107.
4. Левченко Е. Н., Калиш Е. А., Шихов Н. В. Влияние новых технологических решений на инвестиционную привлекательность редкометалльно-титановых россыпей. Сб. материалов IX Конгресса обогатителей стран СНГ. Т. 1, 2013, С. 342–346.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ – НОВАЯ ПАРАДИГМА В ИЗУЧЕНИИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕЩЕСТВА КОМПЛЕКСНЫХ ЭНДОГЕННЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Турсебеков А. Х.¹, Шарипов Х. Т.², Олимов Т. Ф.³

¹Институт геологии и геофизики АН РУз,

²Ташкентский химико-технологический институт,

³Институт минеральных ресурсов Госкомгеологии РУз, Ташкент, sharkhas@yandex.ru

У истоков нового направления в минералогии технологической минералогии нерудного и рудного минерального сырья – стояли крупные специалисты (А. И. Гинзбург, В. И. Ревнивцев, В. М. Изюитко, Б. И. Пирогов, В. И. Кузьмин, Г. А. Сидоренко, А. Х. Турсебеков, В. В. Щипцов и др.). Технологическая минералогия (**industry mineralogy**) возникла на стыке минералогии и технологии переработки минерального сырья. Развитие данного научного направления в настоящее время является важным с экономических позиций. В частности при современных масштабах добычи цветных и благородных редких металлов повышение их извлечения только на 1 % дает неизмеримую прибыль [1].

Долгое время роль минералогических исследований в основном сводились к вспомогательным операциям по изучению минерального состава руд и продуктов обогащения. В настоящее время технологическая минералогия расширила поле своей деятельности в связи с вовлечением в производство не только отрабатываемых, но и новых видов нетрадиционного минерального сырья (горные породы, нерудное минеральное сырьё, руды различных типов месторождений, отходы химической, горно-металлургической, энергетической промышленности и др.), многие из которых по своим качествам упорные, труднообогащаемые. Следует отметить особую роль технологической минералогии в новой тенденции перехода научных геохимических и кристаллохимических исследований на микро и наноразмерные уровни свойств и состава вещества в системе «порода → руда → отходы → минерал → элемент».

Современная технологическая минералогия, обладая мощным арсеналом приемов и методов исследования, позволяет решать многие задачи по технологической оценке эндогенных руд и их комплексному использованию, которое может способствовать созданию новых технологий, базирующихся на физических и химических и других свойствах пород, руд, минералов, микроминералов, наночастиц и атомов.

Вхождение в микро- и наноразмерную технологическую минералогия, что рассматривается в ряде работ (Р. И. Канеев и др. 2006; В. И. Ревнивцев и др. 1992; Н. П. Юшкин, 2005; Г. М. Чоботарев и др. 1988; В. Г. Моисеенко, 2009; А. Х. Турсебеков 2007, 2012) [2–10], возможно через понятие поверхностных свойств микро-, наночастиц вещества. В настоящее время установлено, что с уменьшением размера до 1–100 нм (структурная единица) микро- и наночастицы обладают специфическими характеристиками физических и химических свойств, создают непредсказуемый потенциал обычным технологиям, изменяющим кинетические и динамические характеристики. Следствием этого становится изучение свойств микро- и наночастиц вещества как составной части нанотехнологии.

В настоящее время на промышленных предприятиях горно-металлургической отрасли Узбекистана и Казахстана в основном извлекаются цветные и благородные металлы из эндогенных месторождений различного типа (Cu, Au, Ag, Cd, Pb, Zn, Mo, Re). Степень комплексного освоения эндогенных руд цветных и благородных металлов недостаточна. Многие недоизвлеченные металлы и сопутствующие ценные элементы (Cu, Zn, Cd, Pb, Se, Te, Ag, Fe, TR, As, Sb, ЭПГ, Re, Mo, Bi, In, Hg, Ga, Ge и др.) теряются в хвостах обогащения, пылях, клинкерах цинкового и медного производств (табл. 1).

Анализ состояния проблемы показал необходимость эффективного использования комплекса цветных, благородных, редких и сопутствующих элементов. Низкий уровень их извлечения объясняется отсутствием достоверной и полной информации о формах их нахождения, их количественных и качественных характеристик в рудах различных месторождений.

При изучении и технологической оценке руд эндогенных и техногенных месторождений за основу необходимо принимать и учитывать их принадлежность к определенным уровням организации вещества. Используя систем-

ный подход к анализу объектов и статистико-вероятным критериям их описания и интерпретации, впервые разработана методика структурно-парагенетического моделирования комплексных по вещественному составу (медно–молибденовая минералого-геохимическая рудная система).

Таблица 1

Ассоциации цветных, благородных, редких и радиоактивных элементов эндогенных месторождений Алмалык-Ангренского рудного района

Месторождения	Рудные компоненты		
	извлекаемые	перспективные для извлечения	установленные, но не извлекаемые
Медно-молибденовые (Кальмакыр и Сары-Чеку)	<u>Cu</u> , Mo, Re, Os-187, <u>Se</u> , <u>Te</u> , S, Au, Ag	<u>Cd</u> , Fe, <u>Bi</u> , Pt, Pd, <u>As</u> , <u>Sb</u> , Rh, Ru, In	<u>Th</u> , U, Σ TR, <u>Tl</u> , Ge, Ga, In, <u>Hg</u> , Pb, <u>Zn</u> , Ni, Co, Fe
Свинцово-цинковые (Курга-шинкан, Алтын-Топкан, Учкулач)	<u>Pb</u> , <u>Zn</u> , <u>Cd</u> , Ag, In, Ba	<u>Cu</u> , Bi, <u>As</u> , <u>Sb</u> , <u>Au</u> , <u>Te</u>	Ga, Ge, <u>Hg</u> , Fe, <u>Tl</u> , TR
Золоторудные (Каульды, Актурпак, Кызылалмасай, Кочбулак и др.)	Au, Ag	<u>As</u> , <u>Sb</u> , <u>Se</u> , <u>Te</u> , <u>Hg</u> , Pt, Pd, Rh	<u>Tl</u> , Ge, In, TR, U, Th

Примечание. Подчеркиванием выделены токсичные элементы.

Нами установлено, что по составу и строению они относятся к категории гетерогенных систем с многоуровневой иерархической структурой организацией вещества, которые отражены в закономерностях пространственной изменчивости элементов, минеральных форм и ассоциаций.

Нами установлено, что по составу и строению они относятся к категории гетерогенных систем с многоуровневой иерархической структурой организации вещества, которые отражены в закономерностях пространственной изменчивости элементов, минеральных форм и ассоциаций.

Время образования (медно-молибденовой минерало-геохимической системы), комплексность и уровень организации вещества (макро, микроминералы, наночастица, аморфные, коллоидные вещества, газовой-жидкие микровключения) создали разнообразие гипо-гипергенных минералов их разновидностей с учетом изоморфных рядов полиморфных превращений

диффузионных процессов в минералах. Установлено, что уровень организации вещества значительно влияет на технологические свойства руд (табл. 2).

В зоне перехода макро- микро-наночастица в направлении к атому элемента уменьшается влияние законов классической механики и возрастает роль квантовой [2].

Составной частью технологической минералогии является изучение химизма минералов, что определяет их практическую значимость как минерального сырья.

Значения химического состава минералов необходимы для разработки оптимальных технологических схем для максимального и полного их извлечения.

Ранее полученный материал с помощью новых локальных аналитических методов по реальному химическому составу минералов уже не соответствуют традиционным представлениям о химизме минерала природных и техногенных систем. На смену идеализированному подходу к минералам как природным твердым образованиям, состав которых подчиняется закону Дж. Дальтона, что находит выражение в стехиометрических формулах, пришла концепция нестехиометрии, объясняемая в настоящее время законами химии и физики твердого тела. Нами установлено, что пирит, халькопирит, молибденит, сфалерит имеют нестехиометрические составы $Fe_{1\pm x}S_{2\pm x}$, $Mo_{1\pm x}S_{2\pm x}$ (табл. 3) где анионы и катионы замещаются изоморфно или изоструктурно Ni, Co, Cu, Re, Bi, Se, Te, As, Sb, Zn, Ag и др.

Главным стержнем любого технологического процесса является максимальное извлечение минералов и элементов из минерально-сырьевых ресурсов. Чтобы достичь этого, необходимо знать структуру вещества, а именно: химический и минеральный состав руд и особенно формы нахождения извлекаемых металлов и размер минерального индивида. Зная это можно подобрать наиболее рациональные технологические схемы их извлечения. Поэтому установление форм нахождения извлекаемых металлов является главной проблемой технологической минералогии, кристаллохимии и геохимии.

Данная проблема решалась на полигоне гигантских золото-медно-молибденовых месторождений Алмалыкского рудного района (табл. 3), перерабатываемых на АГМК. Кроме основных промышленных минералов меди (халькопирит,

борнит, халькозин и др.) и молибдена (молибденит) золото и серебра, установлена целая плеяда сопутствующих промышленным рудам элементов – Pb, Zn, As, Sb, Cd, Co, Ni, Sn, W, Se, Te, Tl, Bi, In, Ga, Ge, Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Os-187 и редкозе-

мельные элементы лантан-цериевой группы, которые в той или иной степени имеют промышленную ценность при условии, если это экономически выгодно при попутном их извлечении или раздельном.

Таблица 2

Уровень организации вещества эндогенных месторождений

Уровень			Вещественное представление системы	Элементы неоднородности	Вещественная характеристика неоднородности	Влияние уровня организации вещества на технологические свойства руд
Организации	Размерный	Строение				
Метасистема	10n м	Локальный	Медно-порфировые месторождения	Рудные тела	Медно-молибденовый штокверковый прожилково-вкрапленный тип руды	Отработка и пробоподготовка руд для обогащения
Субмакросистема	102–101 м	Сублокальный	Рудное тело	Минеральные типы руд	Совмещенные типы руд: медно-молибденовый; скарноиды с полиметаллами (золотом); жильный золотосеребряный	
Макросистема	102–101 м	Макроскопический	Минеральный тип руд	Минеральные агрегаты	Прожилки, вкрапленность, минеральные ассоциации: молибденита, блеклой руды, халькопирита и др.	Извлечение минералов методом обогащения (гравитационно-флотационная технология)
Микросистема	102–101 м	Микроскопический	Минеральный агрегат	Зерна минералов	Матрицы: пирит, халькопирит, молибденит, магнетит, блеклая руда, гематит, самородное золото	Извлекаются до 0,074 мм, <0,074 мм не извлекаются (гравитационно-флотационным методом)
Субмикросистема	102–101 м	Субмикроскопический	Зерно минерала (матрица)	Микроминералы	Самородное золото, теллуриды золота, серебра, минералы кобальта, никеля, селена, теллура, рения, висмута и др.	Извлекаются только с матрицами минералов: сульфиды, оксиды и др. методом обогащения
Наносистема	102–101 м	Ультрамикроскопический	Ультрадисперсные минеральные агрегаты	Наночастицы	Аи, Ag, Си, Se, Te, Bi, Mo, Re, платиноиды и др. аморфные, коллоидные вещества	Неизвлекаемые формы минералов, шламирование, помехи при извлечении и получении качественных концентратов

Минеральные формы нахождения установлены для следующих рудообразующих, благородных, редких, редкоземельных элементов, которые ранее считались изоморфными в составе минералов: Pb, Zn, As, Sb, Ni, Co, Sn, Se, Te, Re, Bi, Cd, Ge, Pd, Pt, редкоземельные элементы. Не определена форма нахождения для Ga и Te. Все формы нахождения эле-

ментов приурочены к сульфидным минералам (табл. 3).

Таким образом, предлагается рациональная схема изучения эндогенных и техногенных месторождений с целью оценки технологических свойств руд и отходов с учетом их геохимических, кристаллохимических и минералогических особенностей (рис. 1).

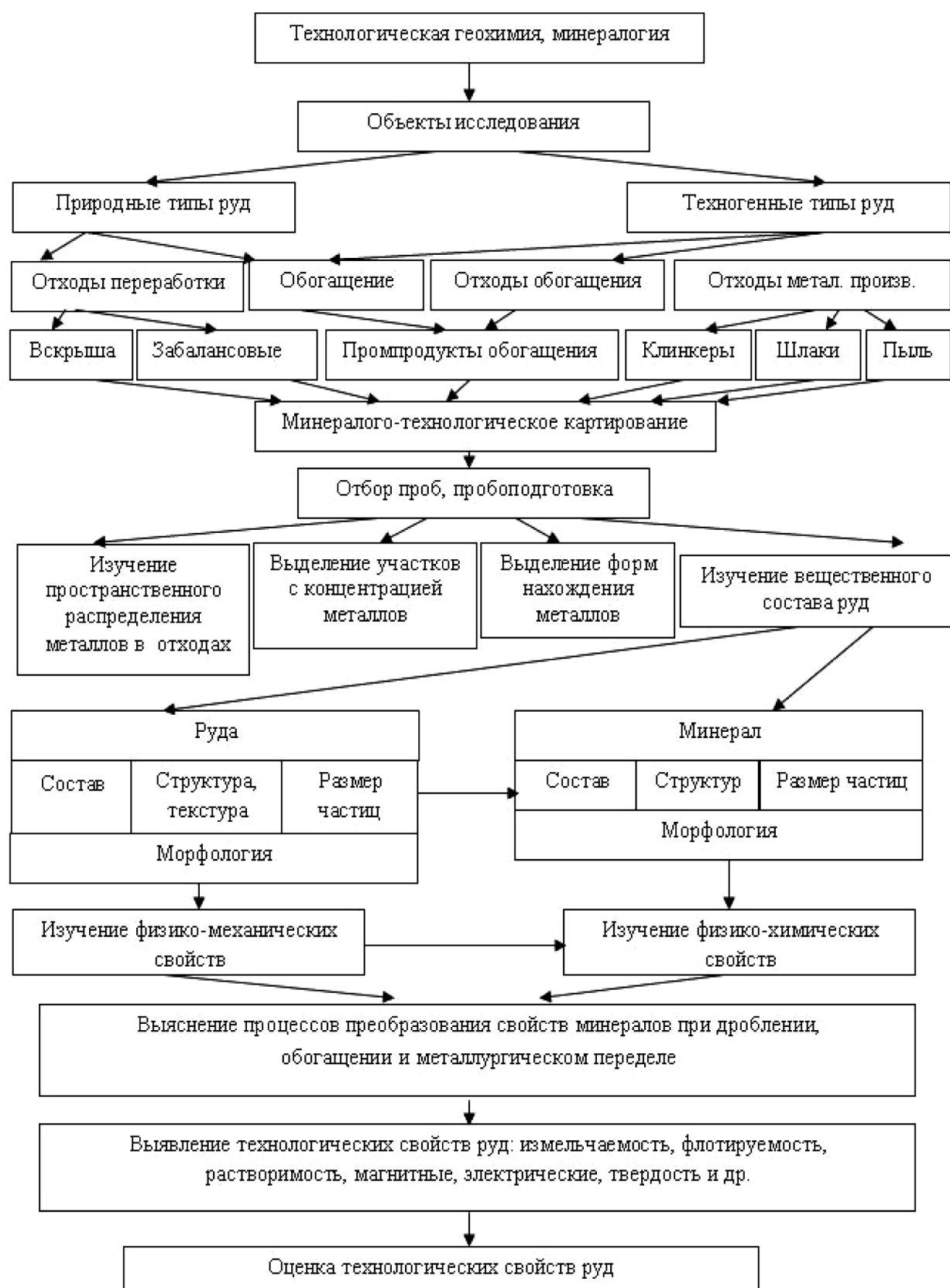


Рис. 1. Рациональная схема оценки технологических свойств руд и отходов с учетом их геохимических, кристаллохимических и минералогических особенностей

Таблица 3

Форма нахождения благородных, редких и рассеянных элементов

Матрица минерала	Элементы примеси	Микроминералы (сингенетические, эпигенетические)
Халькопирит $Cu_{1\pm x}Fe_{1\pm x}S_{2\pm x}$	(Se),(Te), (Bi),(Ni), (Co),(Re), (In),(Sn), Ga,(Ge), (Au),Tl, (Cd),(Ag), (Sn)	Карролит($CoCuS_4$), галеноклаусталит ($PbSeS$), моусанит ($Cu_6Te_2SnS_8$), колу-сит $Cu_6(SnAs)S_8$, станин (Cu_2TeSnS_4), гессит (Ag_4SeS), калаверит ($AuTe_2$), крене-рит (Ag_2AuTe_2), тетрадимит($CuPbBiS_3$), платинит ($PtBi_2Se_2S$), берриит ($CuAg_2Bi_4S_{11}$), матильдит($AgBiS_2$), дисульфид молибдена и рения ($MoReS_2$), дисульфид железа, меди и рения($CuFeReS_2$), сульфид рения (ReS_2), интерметаллит ($AuBi$), викингит ($Ag_3Pb_3Bi_3S_{30}$), сульфид Te (Te_2S_2), виттихенит (Cu_3BiS_3), науманит (Ag_2Se), алексит ($PbBi_2Te_2S_2$), висмутин (Bi_2S_3), жозенит-А($BiTeS_2$), жозенит-Б (Bi_4TeS_2), самородные элементы (Te,Bi), фишессерит (Ag_3AuSe_2), петцит ($AgAu_4Te_2$), козалит (Pb_2BiS_5), глауколот (Co,Fe)AsS, сафлорит ($CoAs_2$), кобальтин ($CoAsS$), самородное золото, сульфовисмутит($Ag_3Pb_5S_{24}$).
Молибденит $Mo_{1\pm x}S_{2\pm x}$	(Se),(Te), (Bi),(Re), (Pb),Au, Cd,Ga,Sn Os-187, $\Sigma TR, Hg, Tl$	Метастабильная фаза ($MoRe$) S_2 , дисульфид молибдена и свинца ($MoPb$) S_2 , галенит PbS, алексит ($PbBi_2Te_2S_2$).
Пирит $Fe_{1\pm x}S_{2\pm x}$	Se,(Te), (Bi), Re, (Ni),(Au), (Co),Ga, Hg, Te, Tl, (Ag),(Cu)	Самородные – золото, висмут, айкинит ($CuPbBiS_3$), анивит($CuZnFeBi$) AsS_{13} , висмутин Bi_2S_3 , галеновисмутит $PbBi_2S_4$, бравоит ($FeCo,Ni$) S_2 , гессит (Ag_2Te)

Примечание. В скобках элементы с установленной формой нахождения, без скобок – минеральные формы не установлены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изоитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. Санкт-Петербург. «Наука», 1997. 592 с.
2. Канеев Р. И. Наноминералогия золота. С-Пб: Delta 2006. 218 с.
3. Моисеенко В. Г. Нанозолото в процессе эксперимента // Материалы междунар. минералогич. семинара «Минералогическая интервенция в микро- и наномир». Сыктывкар, 2009. С. 53–58.
4. Наркелюн Л. Ф и др. Проблемы комплексного использования недр Забайкалья // Мат-лы конф. «Новый век, новые открытия». Чита, 2001. С. 28–31.
5. Ревнивцев В. И. и др. Технологическая минералогия обломочных частиц. Санкт-Петербург. «Наука» 1992. 243 с.
6. Туресебеков А. Х., Василевский Б. Б. Уровень организации вещества при оценке масштабности и технологических свойств руд различных типов месторождений // Геология и минеральные ресурсы. 2007. № 1. С. 12–18.
7. Туресебеков А. Х., Василевский Б. Б., Маринова С. Т. Технологическая минералогия месторождения Большой Калмакыр. Ташкент 2012. 107 с. .
8. Чоботарев Г. М., Туресебеков А. Х. Опарогенезисах микроминералов руд (на примере медно молибденовых месторождений) // Узб. Геол. Журн. 1988 № 2.
9. Юргенсон Г. А. Уровень организации вещества как иерархическая основа для разработки минералогическо-геохимических критериев оруденения // Четверть века отраслевой науки Забайкалья. Чита, 1989. С. 115–118.
10. Юшкин Н. П. Ультра и микродисперсное состояние минерального вещества и проблем наноминералогии // Наноминералогия ультра-и микродисперсных систем минерального вещества. СПб: «Наука» 2005. С. 11–61.

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАТИНОСОДЕРЖАЩИХ ДУНИТОВЫХ РУД СРЕДНЕГО УРАЛА

Козлов А. П.

ИПКОН РАН, г. Москва, kozap@mail.ru

Металлы платиновой группы (МПГ) представляют собой ценное минеральное сырьё, которое за счет своих особых физико-химических свойств находит широкое применение во мно-

гих отраслях промышленности. Рыночная цена на платиноиды неуклонно растет, так как они находят широкое применение в новейших технологиях.

Для сохранения, а в перспективе и увеличения объемов добычи платины в России, актуальным представляется вовлечение в эксплуатацию новых геолого-промышленных типов месторождений МПГ, среди которых наиболее значительным потенциалом обладают зональные базит-ультрабазитовые комплексы, как коренные источники уникальных россыпных месторождений Урала, Алдана и Камчатки. Основанием для проведения детального минералого-технологического изучения рудных платинометаллических ассоциаций зональных комплексов Платиноносного пояса Урала, явилась установленная промышленная значимость платиносодержащих дунитов Гальмэ-Энанского массива на севере Камчатки [1]. Аналогичные рудные зоны в последние годы были выделены и на Среднем Урале среди дунитов Светлоборского массива [2], а также существуют реальные предпосылки их открытия и локализации в пределах Нижнетагильского массива [3].

Проведение прогнозной оценки обогатимости платиносодержащих дунитовых руд Среднего Урала и разработка принципиальной технологической схемы их обогащения, определяют необходимость получения полной и достоверной информации об особенностях продуктивного оруденения, которое характеризуется крайне неравномерным распределением. В процессе проведения комплексных минералого-технологических исследований решались следующие задачи:

- установить формы нахождения платины в дунитах, качественный и количественный состав платиносодержащей минерализации;
- выявить основные рудные минеральные ассоциации, определить уровень их продуктивности, различия в составе и технологических свойствах;
- выделить контрастные технологические свойства минералов МПГ и предварительно определить оптимальные методы их извлечения.

Объектами исследований являлись Нижнетагильский и Светлоборский зональные дунит-пироксенитовые массивы, по каждому из которых было отобрано 7 минералого-технологических проб массой 10–15 кг, а также образцы для изготовления аншлифов.

Результаты химического анализа показали, что материал всех минералого-технологических проб представлен высокомагнезиальными дунитами (35–44 мас. % SiO_2 , до 45 мас. % MgO), при этом в выборке Светлоборского массива они определяются более железистыми (до 12,2 мас. % Fe_2O_3).

Главным породообразующим минералом является оливин, состав которого отвечает форстериту (F_{92} – F_{85}). Редкие зерна клинопироксена относятся к группе диопсида. Породы подвержены интенсивным вторичным изменениям. Для состава серпентина, основного минерала вторичных изменений, характерны два тренда, один из которых соответствует изоморфизму между SiO_2 и FeO , без изменения содержания MgO . Этот серпентин имеет петельчатую структуру и встречается в слабоизмененных разностях дунита. Второй представлен массивным и жильным серпентином и имеет повышенную железистость при неизменном соотношении других компонентов.

Состав хромшпинелида, основного рудного минерала дунитов, является характерным для зональных массивов урало-аляскинского типа. В слабоизмененных разностях дунитов выделяется отчетливый тренд составов Cr-Fe^{3+} (феррихромит) с убыванием Al при увеличении Fe^{3+} . В серпентинизированных разностях дунитов хромшпинелиды обеднены глиноземом.

Весьма распространенным рудным минералом в дунитах Светлоборского массива отмечается магнетит, что вероятно и увеличивает их железистость. Он часто встречается в тесном срастании с минералами МПГ, окружает их зерна со всех сторон, заполняет трещины и поры, что свидетельствует о его позднем наложенном характере.

Из дунитов Светлоборского массива для исследований отобрано 1162 зерна минералов МПГ, при этом более половины из них выделены из гравитационного концентрата после дробления проб до 2 мм. Платиноиды характеризуются различной морфологией выделений. Наиболее крупные индивиды (+500 мкм) имеют неправильную форму и часто находятся в срастании с оливином. Значительная часть мелких зерен имеет кристаллическую форму с преобладанием кубической огранки. Кристаллы имеют белый цвет и металлический блеск и находятся преимущественно в немагнитной фракции (около 60 мас. % выделенной платиносодержащей минерализации).

В составе продуктивной платиносодержащей минерализации Светлоборского массива преобладают железо-платиновые сплавы – изоферроплатина (Pt_3Fe), тетраферроплатина (PtFe) и туламинит ($\text{Pt}_3(\text{Cu,Fe})$) (рис. 1А). Доминирует изоферроплатина, которая во многих зернах частично или полностью замещается сплавами с примесью меди, в первую очередь туламинитом

(рис. 2А). Прочие минералы МПГ в большинстве случаев присутствуют в сростании с железо-платиновыми сплавами или в виде включений в них. Выделяются платино–осмиевый и реже

платино–иридиевый равновесные парагенезисы (рис. 1Б), при этом в самородном осмии концентрация Ir не превышает 14 ат. %, а иридий значительно обогащен Pt.

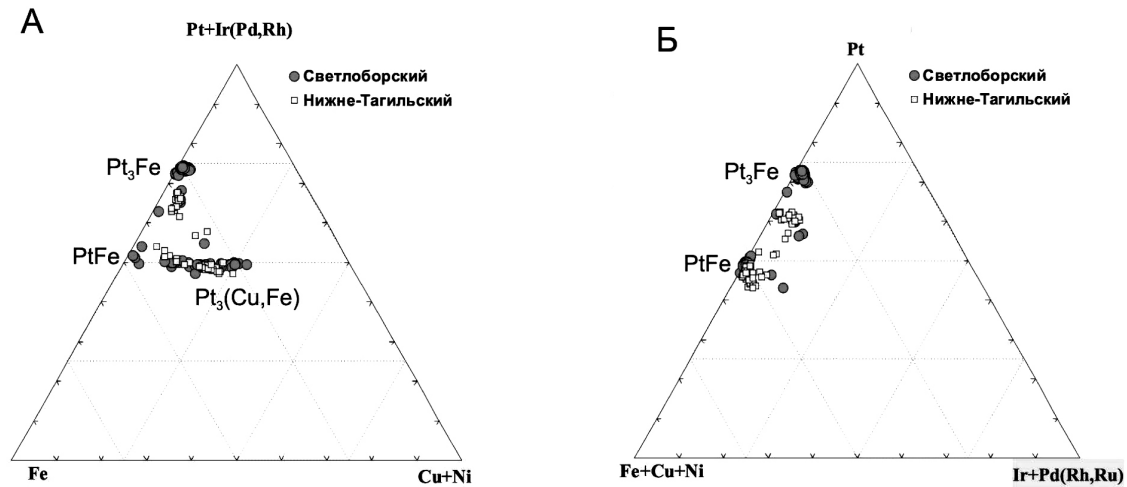


Рис. 1. Составы Pt-Fe и Pt-Fe-Cu-Ni сплавов в дунитах Светлоборского и Нижнетагильского массивов (А) и количество в них примеси Ir+Pd (Rh, Ru) (Б)

В парагенезисе с изоферроплатиной часто встречаются сульфиды рутения и осмия, преимущественно, эрликманит (OsS_2), который иногда присутствует и в виде свободных кристаллов. Лаурит (RuS_2), как правило, слагает внутреннюю часть зерен эрликманита (рис. 2Б), что свидетельствует о повышении активности серы в процессе формирования магматических сульфидов. Распространенной сульфидной минеральной фазой является баоит (Rh_2S_3), который является наиболее поздним и часто ассоциирует с вторичным магнетитом (Mt) (рис. 2В). Трещины крупных выделений баоита иногда выполнены вторичным туламинитом и тетраферроплатиной (рис. 2Г). В пробах установлены также сперрилит (PtAs_2) и куперит (PtS), которые встречаются как в сростании с изоферроплатиной, так и в виде отдельных зерен (рис. 2Д). Очень редко отмечаются сульфоарсениды МПГ системы ирарсит-платарсит-холлингвортит и соединения с сурьмой и мышьяком. Часто встречается окисленная платина (Pt-oxide), зерна которой обладают пористой микроструктурой, иногда с концентрически зональным рисунком (рис. 2Е). Зоны отличаются по цвету, что вероятно определяется разной степенью окисления.

Основными характерными особенностями платиновых парагенезисов в дунитах Светлоборского массива являются:

- преобладающая минеральная форма – изоферроплатина, которая во многих зернах частично

или полностью замещается туламинитом и Pt-Cu сплавами;

- тонковкрапленное размещение продуктивной платиносодержащей минерализации в оливковой матрице и отсутствие сростков с хромшпинелидами;

- тесная ассоциация минералов МПГ с вторичным магнетитом.

Определяющей для платинометалльного оруденения Светлоборского массива является минеральная ассоциация платиноносных дунитов, которую также отличают: широкий диапазон состава минералов МПГ; обогащенность рудоформирующей системы элементами Os, Ir, Rh и активность S и As в ней; включения в платиноидах Fe-Ni-сульфидов [4].

Из дунитов Нижнетагильского массива отобрано около 2000 зерен минералов МПГ. В гранулометрическом составе преобладают мелкие зерна (-100 мкм), которые представлены в основном ограниченными кристаллами. Более крупные индивиды (до 500 мкм) находятся преимущественно в сростках с хромшпинелидами. Большая часть платиносодержащей минерализации выделена из магнитной фракции гравитационных концентратов.

В составе платиносодержащей минерализации дунитов Нижнетагильского массива преобладают железо-платиновые сплавы с примесью меди и никеля (Pt-Fe-Cu-Ni) (рис. 1А). В отличие от Светлоборского массива, где они в основном об-

разуют оторочки в зернах изоферроплатины, здесь они часто представлены самостоятельными эвгдральными зернами или кубическими кристаллами (рис. 3А). При замещении Pt-Cu сплавами зерна приобретают неправильную форму с неровными очертаниями с проявлением зональной микроструктуры (рис. 3Б). Несмотря на свою кристаллическую форму, туламинит, также как и Pt-Cu спла-

вы, имеет вторичное происхождение и замещает предшествующие ему изоферроплатиту и железистую платину (Pt,Fe). Процесс замещения, вероятно, был длительным и полным, поскольку первичные железо-платиновые сплавы отмечаются здесь крайне редко. Ряд замещения Pt-Fe(Ni) → Pt-Fe-Cu-Ni → Pt-Cu и характеризуется увеличением количества меди в системе.

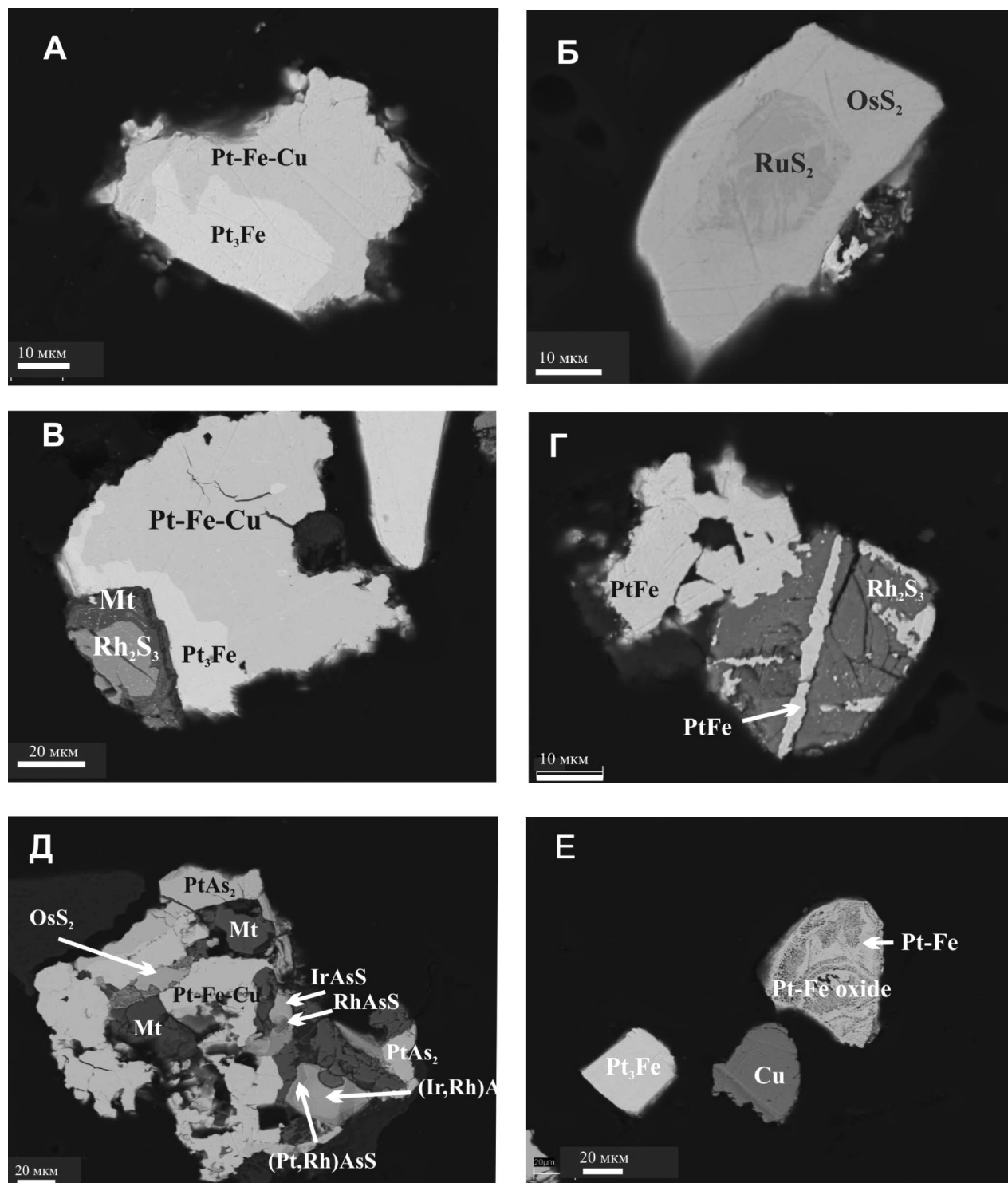


Рис. 2. Микропарагенезисы минералов МПГ в дунитах Светлоборского массива

Прочие минералы МПГ в исследуемых пробах представлены очень скудно. Преимущественно это редкие включения осмия и иридия в платине (платино–осмиевый и платино–иридиевый магматические парагенезисы), названная фаза RhNiAs и единичные включения лаури-та (рис. 3В, Г, Е). Часто в платиновых микропарагенезисах Нижнетагильского массива встречается окисленная платина (Pt-oxide), но в отличие от

Светлоборского массива, окисление имеет иной характер. Выделения Pt-oxide образуют прерывистые и концентрические каймы по туламиниту, при этом центральная часть зерен остается гомогенной и неподверженной изменениям (рис. 3Д). Распространенным минералом рудной ассоциации является миллерит (NiS), который встречается как в сростании со сплавами МПГ, так и в виде отдельных, хорошо ограненных кристаллов.

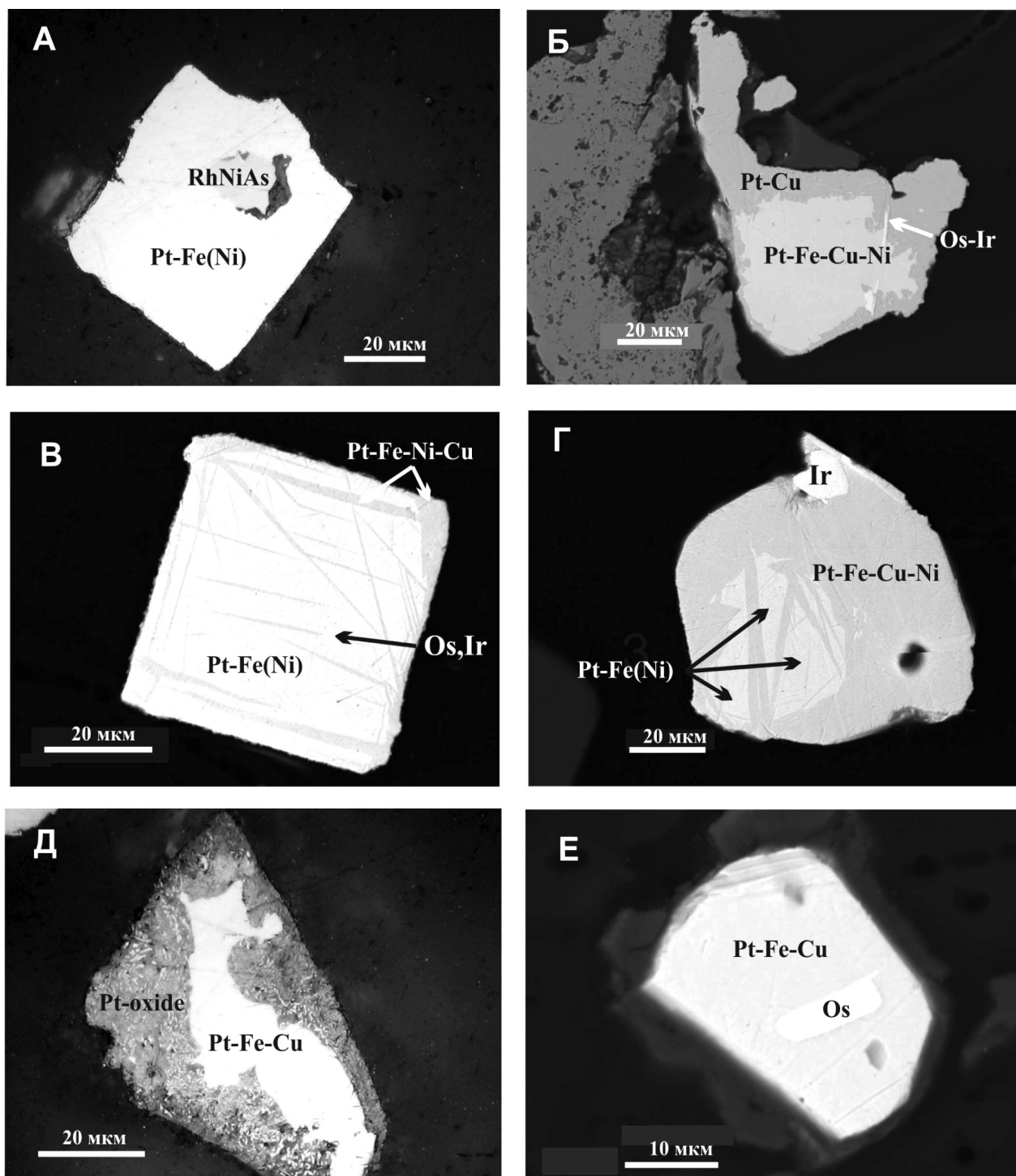


Рис. 3. Микропарагенезисы минералов МПГ в дунитах Нижнетагильского массива

Основными характерными особенностями платиновых парагенезисов в дунитах Нижнетагильского массива являются:

- резкое преобладание в составе – вторичных Pt-Fe-Ni-Cu-сплавов;
- наличие зерен высоко-железистой первичной платины;
- одновременное присутствие мелких (40–60 мкм) кристаллов минералов МПГ, которые включены в оливиновую матрицу и более крупные зерна тесно связаны с хромитовыми обособлениями.

Подавляющее количество выделений платиносодержащих минералов в дунитах с высокими содержанием платины представлено относительно крупными гнездами и вкраплениями, которые располагаются в краевых частях хромитовых обособлений. Иногда они выходят за их пределы и размещаются непосредственно в оливиновой матрице. Количественная оценка, проведенная методами оптической микроскопии, показала, что не менее 80 % продуктивности платинометалльного оруденения Нижнетагильского массива определяет платинохромитовая минеральная ассоциация, которую отличает: никелистый характер магматической рудоформирующей системы; постмагматическая эволюция составов минералов МПГ в направлении: $Pt, Fe \rightarrow Pt_2(Fe, Ni) \rightarrow PtCu_3 \rightarrow Pt\text{-oxide}$. Минеральная ассоциация платиноносных дунитов имеет выраженное подчиненное значение [4].

Сравнение продуктивных платиновых парагенезисов в дунитах Среднего Урала и Камчатки позволяет выделить их общие типоморфные признаки [5]:

- значительное преобладание в составе железо-платиновых сплавов над другими минералами МПГ;
- развитие двух магматических парагенезисов раннего платино–осмиевого и последующего платино–иридиевого в равновесии с магматическими сульфидами $(Ru, Os)S_2$ переменного состава;
- проявление наложенной сульфидно–арсенидной минерализации с иридиевой или родиевой специализаций (ирарсит–холингвортит);
- постмагматическая эволюция рудных парагенезисов, направленная на увеличение медистой составляющей в системе (туламинит, холингвортит, платино–медные сплавы);
- развитие окислительно–восстановительных процессов на заключительной стадии формирования рудных ассоциаций: оксиды платины и много-

компонентные сплавы, восстановленные из сульфидов МПГ (Ir-Rh-Fe), вторичный магнетит.

Анализ полученных результатов позволяет выделить основные различия продуктивных платиновых парагенезисов и определить ряд технологических особенностей извлечения платины из дунитов Среднего Урала:

1. Основная часть продуктивной платиносодержащей минерализации в дунитах Гальмознанского массива (Камчатка) находится в классах крупности +200 мкм, что определяет возможность эффективного извлечения платины гравитационными методами. В дунитах Светлоборского и Нижнетагильского массивов (Среднего Урала) более 80 % зерен минералов МПГ имеет крупность менее 100 мкм. Это может резко снизить эффективность апробированного для камчатских дунитов технологического процесса стадийного измельчения и последовательного гравитационного извлечения платиносодержащей минерализации в крупных и средних классах, и определяет необходимость использования в технологической схеме процессов доизвлечения тонких фракций платиноидов из хвостовых и шламовых продуктов.

2. Платиносодержащая минерализация в дунитах Среднего Урала характеризуется присутствием значительного количества медь- и никельсодержащих минералов МПГ (туламинит, никельферроплатина, холингвортит, платино–медные сплавы), которые, как правило, замещают первичные Fe-Pt сплавы. Эти минералы отличаются низкой микротвердостью (в 3–8 раз), что определяет возможность их селективного переизмельчения и, как следствие, значительные потери платины со шламовыми продуктами.

3. При разделении платиносодержащих дунитовых руд Гальмознанского массива средний выход платины в магнитную фракцию не превышал 40 %. В дунитах Среднего Урала значительное количество платиносодержащей минерализации имеет выраженные магнитные свойства и образует тесные сростания с вторичным магнетитом и различными Fe-содержащими сплавами. Это позволяет рассчитывать на возможность более эффективного использования в технологическом процессе методов магнитной сепарации.

Детальное минералого-технологическое изучение платиносодержащих дунитовых руд Среднего Урала показало необходимость применения комбинированной технологической схемы, которая помимо стадийного измельчения и последовательного гравитационного извлечения платиноидов

в крупных и средних классах, должна включать селективную концентрацию мелких и тонких классов платиноидов из хвостовых и шламовых продуктов методами флотации и магнитной сепарации.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН №27 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 12-05-00260).

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов А. П., Чантурия В. А. Платиносодержащие дунитовые руды и их обогатимость. Москва: УРАН ИПКОН РАН, 2009. 148 с.
2. Телегин Ю. М., Телегина Т. В., Толстых Н. Д. Геологические особенности рудопроявлений платины Светлоборского и Каменушинского массивов Платиноносного пояса Урала // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Екатеринбург, 2009, Том 2. С. 212–215.
3. Иванов О. К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 1997. 488 с.
4. Толстых Н. Д., Козлов А. П., Телегин Ю. М. Коренная платиновая минерализация Светлоборского и Нижне-Тагильского массивов, Платиноносный пояс Урала // Платина России. Том VII. Красноярск, 2011. С. 297–312.
5. Козлов А. П., Чантурия В. А., Сидоров Е. Г., Толстых Н. Д., Телегин Ю. М. Крупно-объемные рудные месторождения платины в зональных базит-ультрабазитовых комплексах урало-аляскинского типа и перспективы их освоения // Геология рудных месторождений, 2011, № 5 (53). С. 419–437.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Ожогина Е. Г.

ФГУП «ВИМС», г. Москва

Расширение отечественной минерально-сырьевой базы по многим видам минерального сырья связывают сегодня исключительно с усовершенствованием существующих и созданием новых комбинированных технологий переработки низкокачественных труднообогатимых руд, которые практически всегда базируются на достоверной информации об их вещественном составе.

Сложность состава и строения труднообогатимых руд в значительной степени определяется следующими минералогическими признаками:

- поликомпонентным, иногда переменным химическим составом, зависимым от присутствия других металлов, формы нахождения которых могут быть различными (изоморфная примесь, самостоятельные минеральные фазы) в одном ряду с главными рудными компонентами;

- сложным морфоструктурным составом, т. е. совместное присутствие рудных минералов разной формы и размеров, нередко тесно ассоциирующих между собой и с пороодообразующими фазами, гетерогенное внутреннее строение зерен минералов (спайность, зональность, трещиноватость, пористость, кавернозность, механические включения, пленки окисления и пр.);

- полиминеральным составом (присутствие нескольких полезных рудных минералов в переменных количествах, образующих агрегаты, и в весьма незначительных количествах, одного-двух промышленно ценных минералов, в различной степени измененных вторичными процессами, минералов непрерывных и дискретных изоморфных рядов и полиморфных и политипных модификаций минералов и пр.);

- близостью физических и физико-химических (технологических) свойств рудообразующих минералов, в первую очередь плотностных и магнитных.

По существу перспективность конкретных видов минерального сырья определяют, с одной стороны, объем затрат на его добычу и переработку, с другой стороны, возможность получения конкурентноспособных товарных продуктов. При этом совершенно очевидно, что содержание компонентов в руде (химический состав) не может в полной мере определить качество руды. Как показывает опыт, важное значение имеют минералогические особенности руд, которые включают в себя форму нахождения полезных металлов и их содержание, размер и морфологию минеральных ин-

дивидов и агрегатов, свойства минералов. Совокупность этих особенностей определяет не только качество руды, но также возможность прогнозирования технологии их передела. В связи с этим резко возрастает роль методов количественного минералогического анализа, надежных по достоверности результатов, чувствительности, высокой производительности.

В конце прошлого столетия в прикладной минералогии происходит существенное изменение в сторону количественного анализа. В настоящее время в геологической отрасли разработаны, аттестованы и внедрены порядка двадцати принципиально различных методов количественного минералогического анализа, комплексирование которых позволяет решать задачи практически любой сложности. Количественные методы минералогического анализа при оценке качества минерального сырья востребованы в разной степени. Значительную роль играют методы оптической микроскопии, позволяющие с различной точностью (III–VI категории точности в соответствии с ГОСТ 41–08–266–04) определить минеральный состав и морфоструктурные характеристики руды и (или) породы. В практике минералого-технологических исследований особое место занимает оптико-геометрический метод, который нередко сегодня называют анализом изображений. По существу анализ изображений определяется как морфоструктурный. С момента возникновения и до настоящего времени он является прямым методом количественного минералогического анализа руд и пород. Практически полная автоматизация методов оптической микроскопии, обеспеченная преимущественно зарубежными системами анализа изображений, привела к значительному расширению его возможностей. В современной практике в процессе анализа возможно не только селективное выделение минералов с последующим определением их гранулярного состава, но и оценка их морфометрических характеристик (удлинения, фактора формы и пр.). Системы анализа изображений широко используются при технологической оценке практически всех видов минерального и техногенного сырья.

Следует оговориться, что современный анализ изображений представляет комплекс методических подходов к геометрическим, рефлектометрическим и денсиметрическим оценкам изображений различных видов полезных ископаемых и может проводиться не только методами оптической микроскопии, но и рентгенотомографиче-

ским, электронно-микроскопическим, микрорентгеноспектральным и другими методами.

Рентгенографический количественный фазовый анализ заслуженно является ведущим среди количественных минералогических методов, так как позволяет определять содержание всех раскристаллизованных минеральных и техногенных фаз, величина кристаллитов которых более 0,02 микрон. По существу, сегодня метод незаменим при изучении полиминеральных, нередко тонкодисперсных руд черных, легирующих и редких металлов. Значимые результаты, например, получены при оценке качества титано-циркониевых руд. Метод широко используется при изучении направленного изменения поверхности минералов, которое позволяет перевести труднообогатимые руды в разряд нормально обогатимых при определении состава продуктов химико-металлургического передела. Современная аппаратура дает возможность определять состав руды не только в порошковых пробах, но и при необходимости в оптических препаратах.

Как показывает опыт, применение методов оптической микроскопии (оптико-минералогического, оптико-петрографического, минераграфического и оптико-геометрического) и рентгенографии необходимы при оценке качества любого вида твердых полезных ископаемых. Сочетание этих методов и привлечение других методов минералогического анализа определяют конкретными задачами и зависят от видов минерального сырья. Например, идентификация фаз микро-нанометрической размерности и определение их гранулярного состава проводятся методами электронной микроскопии, а определение элементного состава минералов – микрорентгеноспектральным (зондовым) анализом. При исследовании минералов и руд железа незаменим сегодня метод Мессбауэровской спектроскопии, позволяющий определять магнитную структуру Fe-содержащих минералов, количество двух- и трехвалентного железа и степень его окисления, существенно влияющих на хрупкость, окисляемость и магнитность железосодержащих минералов, а, следовательно, на показатели переработки слагаемых железных руд.

Особо следует отметить количественные минералогические методы определения физических свойств минералов (плотность, микротвердость, термо-ЭДС, удельная магнитная восприимчивость и пр.), определяющих поведение минералов и руд в целом в процессах обогащения.

Интенсивное внедрение количественных минералогических методов в практику лабораторных исследований, связанных с оценкой качества сырья, обозначило ряд проблем. Данные проблемы сводятся к следующему:

1. Приборной базой, позволяющей проводить комплексный количественный минералогический анализ, обладают крупные научно-исследовательские и производственные организации, в то время, как оценкой качества полезных ископаемых минералогическими методами занимаются специалисты в лабораториях различного уровня и ранга, нередко имеющие в арсенале только оптические микроскопы отечественного производства.

2. Выполнение минералогических исследований в различных организациях делает необходимым приведение их деятельности в соответствие с требованиями промышленно развитых стран. В первую очередь, это аккредитация лабораторий по единым правилам, в которых четко сформулированы требования к качеству результатов анализа. Сегодня еще многочисленные минералогические анализы особенно продуктов обогащения руд выполняются в не аккредитованных лабораториях и не могут быть признанными количественными.

3. Резко возросший в последние годы объем минералого-аналитических работ, направленных на решение технологических задач привел к тому, что часть работ попала в сферу государственного метрологического контроля и надзора, что привело к необходимости выполнения требований межотраслевых и государственных нормативных документов в области метрологии и стандартизации.

4. Количественный минералогический анализ проводится на приборах, требующих обязательной поверки и контроля, поэтому необходимо создание стандартных образцов фазового со-

става и свойств (СОФС). К сожалению, количество СОФС сегодня незначительно, изготовлены они из руд месторождений определенных формационных типов. В практике минералогических исследований нередко используются стандартные образцы фазового состава и свойств минералов предприятий, не имеющие отраслевого признания. В настоящее время назрела необходимость изготовления СОФС из технологических типов руд и продуктов их обогащения.

5. Достоверность результатов базируется на системе метрологического обеспечения всех видов минералогических работ, поэтому их основой является метрологически оцененный метод (или методика), оформленный как нормативно-методический документ по конкретному виду анализа с определением области применения и типу сырья. Применяемые сегодня методики, особенно разработанные во второй половине прошлого века, далеко не всегда удовлетворяют современному уровню, поэтому требуется их актуализация и переоформление. Следует отметить, что появились новые методы фазового анализа, используемые в оценке качества полезных ископаемых (рентгеновская микротомография), и новые виды сырья (отходы промышленного производства – шлаки, золы, пыли и пр.). Следовательно, необходима разработка методов (методик) их минералогического изучения.

В заключение следует отметить необходимость постоянного модифицирования и комплексирования количественных минералогических методов оценки качества различных видов минерального сырья, включая минеральное сырье нового поколения, в зависимости от поставленной задачи, внедрения достижений науки, особенно в области физико-математических и информационных технологий.

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТРУДНООБОГАТИМОЕ МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ

Котова О. Б.

ИГ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, kotova@geo.komisc.ru

В свое время академик А. Е. Ферсман ввел понятие «комплексности использования минерального сырья». Современные достижения в области физических и технических дисциплин,

наук о Земле раскрыли широкие принципиальные возможности извлечения практически всех ценных минералов (химических элементов и их соединений) при весьма низких их содер-

жаниях в перерабатываемом многокомпонентном сырье. Удовлетворение возрастающих потребностей в минеральном сырье при истощении сырьевой базы следует связывать с созданием и применением новых технологий, реализующих задачи по комплексному извлечению полезных компонентов и утилизации отходов. Развитие теоретической и экспериментальной базы энергосберегающих и экологически приемлемых технологий переработки минерального сырья имеет важное значение для развития национальной экономики страны. Данная проблема включена в перечень критических технологий.

К отличительным особенностям вещественного состава труднообогатимых руд эксплуатируемых месторождений относится их поликомпонентный, иногда имеющий переменный химический состав, сложная морфоструктура, близость физических и физико-химических (технологических) свойств рудообразующих минералов. Обработка руды и минералов в различных полях обеспечивает изменения их физико-химических свойств, включая эффективное вскрытие, что способствует интенсификации процессов рудоподготовки и обогащения. Известно, что основная часть энергии расходуется на дробление и измельчение руды. Чтобы снизить эти потери при переработке тонковкрапленных руд без переизмельчения разрабатываются немеханические способы за счет механизмов дезинтеграции и разупрочнения минеральных комплексов. Процессы селективной дезинтеграции должны приводить к полному раскрытию минералов по границам для последующего их разделения по физико-химическим свойствам [1]. Основные принципы рационального процесса селективного разрушения минеральных комплексов рассмотрены в работе Л. А. Вайсберга и Л. П. Зарогатского [2]. Физический смысл разупрочнения состоит в понижении прочности материала за счет механизмов рекристаллизации, структурных изменений [3–8].

В нашей стране и за рубежом проводятся исследования по разработке различных методов рудоподготовки и обогащения природного минерального и техногенного сырья. В долгосрочных Программах развития научно-технологического комплекса России до 2020 года отмечено, что разработка технологий разрушения горных пород и дезинтеграция минеральных комплексов на основе сложных и комбинированных энергетических воздействий явля-

ется одним из приоритетных направлений исследований. Сегодня это направление успешно развивается благодаря последователям идей И. Н. Плаксина [9]. Работы активно проводятся как в академических институтах (ИПКОН РАН, ИГД СО РАН, ИГ Коми НЦ УрО РАН и др.), так и научно-производственных объединениях (НПК «Механобр-Техника» и др.). Координация исследований осуществляется в рамках проводимых совещаний (ежегодные «Плаксинские чтения», семинары по технологической минералогии и др.).

Энергетические воздействия могут быть простыми (от источника к минеральному сырью) и комбинированными (сочетание источников воздействия на минеральное сырье) [9, 10, 11]. Методы энергетического модифицирования минерального сырья, несомненно, расширяют возможности технологических процессов рудоподготовки и обогащения полезных ископаемых. Большой интерес представляют методы, использующие плазменное состояние вещества. Так называемые импульсные технологии (Pulsed Power) применяются сегодня в горно-перерабатывающей промышленности.

Любой метод имеет не только преимущества, но и недостатки. В работе [6] проведен анализ так называемых нетрадиционных методов обработки минерального сырья. Сравниваются различные виды воздействия: (электрохимическая обработка, ускоренные электроны, СВЧ-обработка, электроимпульсная обработка, электрогидродинамическое воздействие, магнитоимпульсная обработка, мощные наносекундные электромагнитные импульсы), которые направлены на повышение эффективности процессов дезинтеграции тонковкрапленных минеральных комплексов для повышения эффективности извлечения ценных минералов в последующих технологических процессах. Автор отмечает как достоинства перечисленных видов энергетических воздействий, так и ограничения (побочный эффект). Все они сравнительно энергозатратны.

Необходимы новые методы и подходы к освоению минерального сырья с использованием современных концепций технологической минералогии. Их применение должно быть связано с такими позициями, как

1. комплексный характер минерального сырья, обусловленный геохимическими законами распределения, концентрациями и рассеяния

химических элементов в процессах образования и метаморфизма горных пород;

2. комплексный минералогический анализ руд по вещественным характеристикам и соотношениям рудообразующих минералов;

3. комбинирование методов энергетического воздействия (включая лазерные) на руды и техногенное сырье в процессах их переработки и обогащения в целях повышения эффективности извлечения полезных компонентов.

В технологиях освоения отдельных видов минерального сырья используются лазеры. Например, при обогащении урана применяется принцип разделения изотопов урана (или других элементов), который основан на избирательном переходе определенных атомов (молекул) в возбужденное состояние. Высокая селективность перехода атомов (молекул) в возбужденное состояние позволяет сепарировать одно соединение элементов от другого в зависимости от длины волны лазерного излучения. Отделение соединений идет либо в физических полях, либо химическим способом, иногда уже на стадии ионизации. При этом отмечается, что энергозатраты лазерного процесса в несколько раз ниже способа обогащения урана с использованием центрифуг [12].

Широкое внедрение подобных технологий происходит крайне медленно. Основными причинами являются недостаточная изученность механизмов лазерного воздействия на минеральное вещество и низкий инструментальный уровень лазерных технологий для целей переработки и обогащения, соответственно, трудности увеличения масштаба процесса от лабораторного уровня до промышленного производства.

Процесс взаимодействия лазерного излучения с минеральным веществом характеризуется рядом существенных особенностей по сравнению, например, с механическим воздействием. Степень воздействия лазерного излучения на минерал (руду) зависит лишь от способности последнего поглощать излучение данной длины волны лазера, в то время как механическая обработка базируется на таких особенностях как твердость и вязкость обрабатываемого материала. Энергозатраты при сверхтонком механическом измельчении превышают 80 кВт. ч/т [3]. Лазерная обработка тонкодисперсного минерального сырья позволяет преодолеть физическую упорность руд без излишнего переизмельчения, происходит пе-

рераспределение вещества с агломерацией полезных минералов и образованием новых фаз. Энергозатраты при решении проблем извлечения тонких и сублимированных ценных минералов в указанных технологиях сопоставимы, но при использовании лазера достигается высокая степень селективности воздействия [16].

В работах по геоматериаловедению [13] показана возможность перераспределения вещества и концентрация металлов в результате высокотемпературного воздействия. В физическом смысле процесс взаимодействия лазерного излучения с рудами (минералами) представляет собой переход энергии фотонов внутри последних в тепловую или фотохимическую энергию, что приводит к плавлению вещества. Наблюдается «выбрасывание» ионизированного вещества с поверхности руды (минерала) в виде частиц расплава, которые подвергаются испарению и выносу. При остывании частицы конденсируются на поверхность минерала [15]. Разработан метод лазерного модифицирования поверхности бокситов, в результате которого происходит перераспределение вещества с агломерацией титановых минералов и образованием новых фаз [16].

Особое значение в технологиях энергетического модифицирования минерального сырья отводится механизмам наноструктурирования. Механизмы наноструктурирования с использованием лазерного излучения были реализованы для такого стратегически важного минерального сырья как углеводороды [17]. Выявление новых механизмов наноструктурной трансформации минерального вещества станет инновационной составляющей научно-технологических разработок в области переработки и обогащения минерального сырья.

Теоретические основы решения проблемы энергетического модифицирования минерального вещества укладываются в рамках развиваемой концепции образования, устойчивости фазовых трансформаций и агрегации ультрадисперсного вещества – нового поколения минерального сырья [14]. Тонкие и сублимированные ценные минералы, благодаря необычным физическим, химическим и механическим свойствам рудообразующих фаз нанометровой размерности, возникшим в результате лазерного воздействия при наложении физических полей, приобретают новые кинетические и динамические характеристики.

Фазовое состояние минеральной системы определяется внешним энергетическим воздействием (температурой, давлением, $h\nu$, pH и др.), набором компонентов и их концентрацией. Переход из одного фазового состояния в другое сопровождается значительным изменением внутреннего строения и физических свойств минеральной системы (рудное или нерудное сырье, техногенные образования). Фазовые превращения сопровождаются изменением кристаллической решетки (перекристаллизацией, полиморфными превращениями, плавлением, аморфизацией). Эти изменения происходят с изменением энергии связи между частицами, поэтому процессы фазовых переходов сопровождаются поглощением или выделением энергии (тепловой), так называемой скрытой энергии превращений [15,16]. Наиболее устойчиво состояние системы с наименьшим значением термодинамического потенциала.

Приложение энергетических воздействий к минеральному сырью вызывает физико-химические явления разнообразной природы. Все многообразие физико-химических явлений можно разделить на три большие группы: на границе минералов (компонентов), в объеме и на поверхности. Роль поверхности и границ при решении проблем дезинтеграции и разупрочнения минералов отмечена в работе [5]. Отмечено, что взаимный контакт зерен по границе срастания минералов приводит к перераспределению электронов и переносу их через границу, возникновению контактной разности потенциалов и электрических полей, образованию валентных связей.

Часто при сложных видах энергетического воздействия используют наложение магнитных полей. Достаточно стабилен интерес к использованию магнитных полей при извлечении золота, немагнитного в обычных условиях. Применение сильномагнитных полей при сепарации мелких и тонких фракций золота на полигонах ЮАР позволяет извлекать до 60 % металла. Авторы работы [19] предложили изменить природные свойства золота, в частности магнитную восприимчивость, для последующего обогащения магнитным способом. Установлено, что «усилить» магнитные свойства золота можно путем вдавливания в относительно мягкий металл частиц из электромагнитной фракции. При этом извлечение золота в электромагнитную фракцию достигает 71 %.

Золото- и платиносодержащие россыпные месторождения Камчатки представляют собой естественные дисперсные смеси минералов, в которых частицы свободного металла отличаются от вмещающих пород своей высокой электропроводностью. В качестве одной из технологий добычи предлагается разделение дисперсного золото- и платиносодержащего сырья, основанное на использовании свойств вихревых токов, индуцируемых переменным магнитным полем в частицах металла [20].

При переходе к наноразмерным частицам необходимо учитывать их особые физические и химические свойства как на межфазных границах (квантовые эффекты) [5], так и в физических полях. Например, золото теряет металлические свойства и приобретает полупроводниковые качества: при окислении наноструктуры золота демонстрируют магнитные свойства [18]. Новизной обладает также та часть исследований, которая направлена на выявление адсорбционных характеристик благородных минералов, в сравнение с другими, которые проявляют себя в адсорбционных полях как основа новых методов доизвлечения тонких и сублимированных полезных минералов.

Таким образом, стратегия исследований и разработок в области технологий разрушения горных пород и дезинтеграции минеральных комплексов должна быть направлена на расширение арсенала методов разупрочнения руд (техногенного сырья) на основе сложных и комбинированных энергетических воздействий и создания готовых алгоритмов взаимосвязи механизмов энергетических воздействий и происходящих в результате этих воздействий изменений физико-химических свойств с целью усиления эффективности технологий извлечения и экологической допустимости используемых схем обогащения.

Лазерные технологии вследствие управляемости процессами формирования полезного компонента (его геометрическими параметрами и физическими свойствами) при комбинировании с другими способами воздействия на минеральное сырье (например, сильные магнитные, адсорбционные поля и др.) открывают принципиально новые возможности в освоении минерального сырья и развития экономики, что составляет актуальность, новизну и значимость подобных исследований.

Работа выполнена в рамках проекта Программы УрО РАН 12-М-35-2055.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ревнивцев В. И., Доливо-Добровольская Г. И., Владимиров П. С. Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб.: Наука, 1992, 102 с.
2. Вайсберг Л. А., Зарогатский Л. П. Основы оптимальной дезинтеграции минералов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2003. № 1. С. 99–106.
3. Ростовцев В. И. Теоретические основы и практика использования электрохимических и радиационных (ускоренные электроны) воздействий в процессе рудоподготовки и обогащения минерального сырья // Вестник Читинского государственного университета. 2010. № 8 (65). С. 91–99.
4. Изотов А. С., Ростовцев В. И. Влияние радиационных воздействий на раскрытие минеральных сростков труднообогатимых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2003. № 2. С. 81–90.
5. Кондратьев С. А., Котова О. Б., Ростовцев В. И. Межзерновые границы в процессах подготовки и обогащения труднообогатимого и техногенного сырья: квантово-механические представления // Известия Коми Научного Центра Уральского отделения РАН. 2010. № 4. С. 47–52.
6. Бунин И. Ж. Мощные наносекундные электромагнитные импульсы и их применение в процессах дезинтеграции минеральных комплексов // Неделя горняка. 2008. С. 376–391.
7. Борисов Л. А., Гришин Ю. М., Козлов Н. П., Серых Н. М., Скрябин А. С. Плазмохимические методы в технологиях получения особо чистого кварца и кремния // Геология и минеральные ресурсы Европейского Севера-Востока России. 2009. С. 347–349.
8. Чантурия В. А., Бунин И. Ж., Ковалев А. Т. Механизмы дезинтеграции минеральных сростков при воздействии мощных электромагнитных импульсов // Известия Академии Наук. Серия «Физическая», 2004, № 5. С. 629–631.
9. Плаксин И. Н. Металлургия благородных металлов. М.: Metallurgizdat, 1958. 366 с.
10. Юсупов Т. С. Теория и практика направленного изменения структуры и свойств минералов в процессах тонкого измельчения с целью интенсификации химической переработки и флотационного обогащения руд // Автореферат на дисс. д-ра техн. наук, М., 1988, 34 с.
11. Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации. М.: Наука, 1993, 207 с. 145.
12. www.rosatom.ru
13. Shushkov D. A., Kotova O. B., Goldin B. A. Geomaterials on the Basis of Analcime-Bearing Rocks / Geomaterials, 2011. № 1. Pp. 33–40.
14. Наноминералогия. СПб.: Наука, 2005.
15. Kotova O. Clay minerals: Adsorbophysical properties. Mater. Sci. Eng. 47 (2013).
16. Котова О. Б., Шушков Д. А., Понарядов А. В., Вахрушев А. В., Тропников Е. М. Разработка и совершенствование теории и методов переработки и обогащения полезных ископаемых и техногенных отходов // Научные основы синтеза минералов и новых материалов, разработки новых геотехнологий, геоматериаловедение, новые исследовательские средства и геоинформационные системы, нанотехнологические исследования / Отв. редактор А. М. Асхабов. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2012. С. 107–118.
17. Kotova O., Tropnikov E. Pulsed power methods for hydrocarbon raw // Acta Mineral. Petrogr. Abstr. Ser., Szeged, IMA, 2010. Budapest, Hungary. Vol. 6. P. 282.
18. Эренбург С. Б. и др. Особенности микроструктуры нанозолота внутри полостей кукурбит урилы по XAFS-спектрам // Письма в ЖЭТФ, 2013, т. 97, вып. 5. С. 326–330.
19. Усков Н. Н., Осташенко Б. А., Майорова Т. П., Филиппов В. Н. Изменение магнитных свойств золота // Обогащение тонкодисперсных руд. – Сыктывкар, 1992. С. 37–45.
20. Дядин В. И., Синявин Д. С. Электродинамическое разделение минералов // Вестник Камчатского государственного технического университета: Петропавловск-Камчатский. 2002. Вып. 1. С. 152–156.

ЗОЛОТО ПИРРОТИНОВОГО УЩЕЛЬЯ: ТЕХНОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Войтеховский Ю. Л., Карнов С. М.

ГИ КНЦ РАН, г. Анапты, woyt@geoksc.apatity.ru

Введение

На всём протяжении зеленокаменного пояса Печенга-Имандра-Варзуга в качестве согласного элемента разреза встречается колчеданное

(пирротин, пирит, халькопирит и др. в разных пропорциях) оруденение. Вопрос об их промышленной отработке для получения серной кислоты был поставлен А. Е. Ферсманом в 1920–х. Тогда

на государственный баланс были поставлены запасы Западных и Восточных пирротинов, расположенных на контакте Хибинского массива и серии Имандра-Варзуга. До II мировой войны проводились технологические испытания руд. После войны вопрос об их использовании не поднимался. В наши дни те же руды привлекли внимание в связи с обнаружением в них большого разнообразия минералов, содержащих Au, Ag и ЭПГ.

Минералогия

Обсуждаемые колчеданные руды – типичные представители докембрийских стратиформных проявлений, возникших и претерпевших длитель-

ную историю развития с вмещающими породами, приобретших эпигенетические черты на завершающей стадии регрессивного метаморфизма. Наиболее изучены проявления Прихибинья (Западные и Восточные Пирротины и Пирротиновое ущелье), уникальные по минеральному разнообразию (табл. 1).

Главный рудный минерал – пирротин, реже – пирит, второстепенные: сфалерит, халькопирит, молибденит и галенит. Впервые в колчеданных проявлениях Прихибинья авторами установлены три типа рудной минерализации: благороднометалльная (табл. 2), ванадиевая (табл. 3) и U-редкоземельная (табл. 4).

Таблица 1

Минеральный состав колчеданных проявлений Прихибинья

Минералы	Формула	Минералы	Формула
Золото	Au	Фторопатит	$\text{Ca}_3[(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})]$
Серебро	Ag	Шерл	$\text{NaFe}_3\text{Al}_6[(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{OH}, \text{F})_{1-3}$
Графит	C	Дравит	$\text{NaMg}_3\text{Al}_6[(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{OH}, \text{F})_{1-3}$
Пирротин	Fe_7S_8	Аксинит (Fe)	$\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2\text{BSi}_4\text{O}_{15}(\text{OH})$
Пирит	FeS_2	Титанит	$\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$
Ульманнит	NiSbS	Рутил	TiO_2
Брейтгауптит	NiSb	Ильменит	FeTiO_3
Марказит	FeS_2	Альбит	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
Арсенопирит	FeAsS	Кальцит	CaCO_3
Лёллингит	FeAs_2	Сидерит	FeCO_3
Саффлорит	$(\text{Co}, \text{Fe})\text{As}_2$	Браннерит	$(\text{U}, \text{Pb})(\text{Ti}, \text{Fe})_2\text{O}_6$
Никелин	NiAs	Уранинит	UO_2
Кобальтин	CoAsS	Торит	$(\text{Th}, \text{U})\text{SiO}_4$
Пентландит	$(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$	Монацит	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})(\text{PO}_4)$
Герсдорфит	NiAsS	Ксенотим (Ce)	$(\text{Y}, \text{Ce})\text{PO}_4$
Сфалерит	ZnS	Бастнезит	CeCO_3F
Халькопирит	CuFeS_2	Кульсонит	FeV_2O_4
Галенит	PbS	Ганит	ZnAl_2O_4
Пентландит	$\text{Ni}(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_8\text{S}_8$	Карелианит	V_2O_3
Молибденит	MoS_2	Голдманит	$\text{Ca}_3\text{V}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Троилит	FeS	Гроссуляр	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Аргентопентландит	$\text{AgFe}_5\text{Ni}_3\text{S}_8$	Мухинит	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{V}[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$
Садбериит	$(\text{Pd}, \text{Ni})\text{Sb}$	«Ванадомухинит»	$\text{Ca}_2\text{V}_2\text{Al}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$
Пираргирит	Ag_3SbS_3	Ферриалланит	$\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Al})[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$
Стефанит	$\text{Ag}_5[\text{S}_1\text{SbS}_3]$	Везувиян	$\text{Ca}_{10}\text{Mg}_2\text{Al}_4(\text{SiO}_4)_5(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH})$
Алтаит	PbTe	Томпсонит	$\text{NaCa}_2\text{Al}_5\text{Si}_5\text{O}_{20} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Гессит	Ag_2Te	Сапонит	$(\text{Ca}, \text{Na})_3(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Волынскит	AgBiTe_2	Mph 1	$(\text{Fe}, \text{Cu}, \text{Ag})\text{Pb}[\text{S}_1\text{SbS}_3]$
Петцит	Ag_3AuTe_2	Mph 2	$\text{Fe-Si-O}(\text{OH})$
V-Диопсид	$\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	Mph 3	$\text{U}, \text{Ti}, \text{Si}, \text{O}$
Кварц	SiO_2	Mph 4	$\text{Th}, \text{U}, \text{Fe}, \text{Y}, \text{P}, \text{Si}, \text{O}$
Эпидимит	$\text{NaBeSi}_3\text{O}_7(\text{OH})$	Mph 5	$(\text{REE}, \text{Ca})(\text{Ti}, \text{V}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Sc})_{21}\text{O}_{38}$
Микроклин	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	Mph 6	$\text{Pd}(\text{Sb}, \text{Te})_2$

Примечание. Жирным шрифтом даны минералы и фазы, установленные в 2012–2013 гг.

Таблица 2
Минералы благородных металлов

Минерал	Формула	Ассоциация
Золото	Au	Au Apy Lo
Гессит	Ag ₂ Te	
Петцит	Ag ₃ AuTe ₂	
Волынскит	AgBiTe ₂	
Садбериит	(Pd, Ni)Sb	
Mph6	Pd(Sb,Te) ₂	
Серебро	Ag	Ag – S Qz
Аргентопентландит	AgFe ₅ Ni ₃ S ₈	
Пираргирит	Ag ₃ SbS ₃	
Стефанит	Ag ₅ [S ₃ SbS ₃]	
Mph 1	(Fe,Cu,Ag) ₄ Pb[S ₃ SbS ₃]	

Благороднометалльная минерализация проявлена в двух парагенетических ассоциациях: Au-лёллингит-арсенопиритовой (рис. 1) и Ag-сульфидно-кварцевой (рис. 2). Минеральные формы благородных металлов представлены элементами, теллуридами, сульфидами, стибнидами и Sb-сульфосолями. Ванадиевая минера-

Таблица 3
Минералы ванадия

Минерал	Формула
Карелианит	V ₂ O ₃
Кульсонит	FeV ₂ O ₄
Голдманит	Ca ₃ V ₂ Si ₃ O ₁₂
Мухинит	Ca ₂ Al ₂ V[SiO ₄][Si ₂ O ₇]O(OH)
Mph «V-Mukh»	Ca ₂ V ₂ Al(SiO ₄)(Si ₂ O ₇)O(OH)
V-Гроссуляр	Ca ₃ (Al, Fe, V) ₂ Si ₃ O ₁₂
V-Титанит	Ca (Ti, V)O(SiO ₄)
V-Диопсид	Ca(Mg, V, Fe)Si ₂ O ₆
Mph 5	(REE, Ca)(Ti,V,Fe,Al,Sc) ₂₁ O ₃₈

лизация проявлена в двух парагенетических ассоциациях: оксидной (карелианит, кульсонит) и силикатной (мухинит, голдманит, гроссуляр, диопсид). U-редкоземельная минерализация представлена простыми и сложными оксидами U и Pb, U-Th силикатами, сложными фосфатами и карбонатами Y-REE.

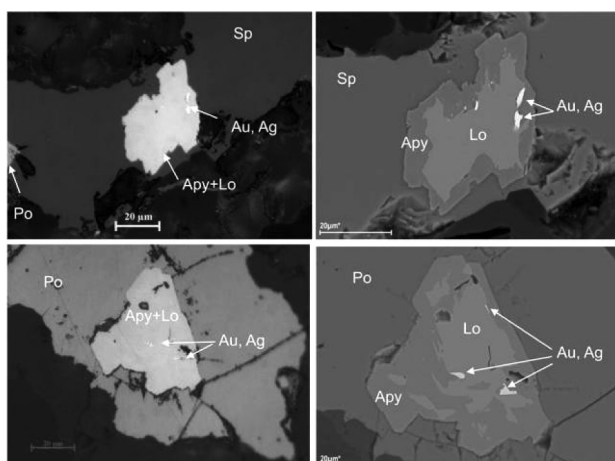


Рис. 1. Au-лёллингит-арсенопиритовая ассоциация

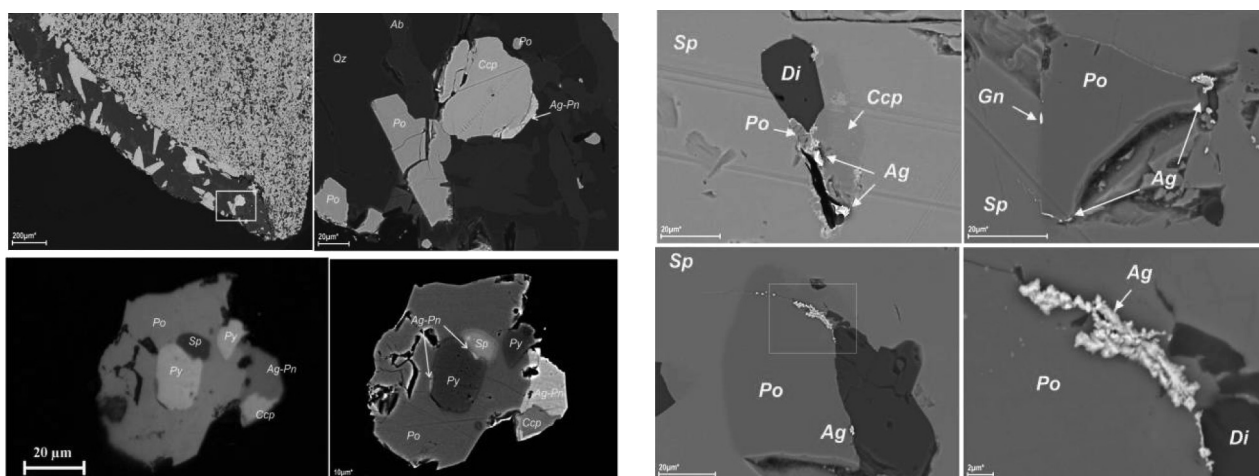


Рис. 2. Ag-сульфидно-кварцевая ассоциация

Таблица 4
Минералы U-Th-REE

Минерал	Формула
Браннерит	(U, Pb)(Ti, Fe) ₂ O ₆
Уранинит	UO ₂
Монацит	(Ce, La, Nd, Th)(PO ₄)
Ксенотим(Ce)	(Y, Ce)PO ₄
Бастнезит	CeCO ₃ F
Торит	(Th, U)SiO ₄
Mph4	Th, U, Fe, Y, P, Si, O
Mph3	U, Ti, Si, O

Температура образования Au-лёллингит-арсенопиритовой ассоциации оценена в 400–450 °C при активности S в 10^{-11} – 10^{-8} . Появление самородного Au, теллуридов Pb и Ag, а также минералов ЭПГ связано с поздними стадиями регрессивного метаморфизма ($T < 300$ °C). Они локализованы по реакционной границе арсенопирита и лёллингита. Ag-сульфидно-кварцевое минералообразование обусловлено воздействием гидротермальных растворов на метаморфизованные колчеданные руды.

Технология

Для оценки возможностей извлечения Au, Ag и ЭПГ из колчеданных руд Прихибинья отобраны две технологические пробы по 500 кг из двух разных участков (Западные пирротины и Пирротиновое ущелье). Для минералогического анализа пробы раздроблены до 1 мм в ГоИ КНЦ РАН. Усреднённые навески по 2,5 кг разделены на 8 классов. По каждому классу крупности проведена магнитная сепарация ручным магнитом Сочнева на фракции: магнитная, электромагнитная и немагнитная. Последняя разделена в бромформе (2,9 г/см³). Для каждого класса крупности получены четыре фракции: магнитная, электромагнитная, немагнитная тяжёлая и немагнитная лёгкая. Всего – 28 частных продуктов. Материал класса –0,025 мм обогащению, сепарации и минералогическому анализу не подвергался ввиду мелкого размера частиц.

Минералогический анализ включал в себя: просмотр фракций под микроскопом в косом освещении и поляризованном проходящем свете на предмет раскрываемости сростков. При этом диагностировались минералы (визуально, с помощью иммерсионных жидкостей, микрореакций, с помощью рентгеноструктурного и рентгенофазового анализов), оценивалось их содержание в каждой фракции. Для уточнения взаимоотношений рудных минералов в различных фрак-

циях изготовлены искусственные аншлифы, изученные в отражённом поляризованном свете на оптическом микроскопе AxioPlan.

Удовлетворительная степень раскрытия зёрен установлена в классе –0,315 + 0,2 мм и менее. Магнитная и электромагнитная фракции представлены большей частью пирротинном, его агрегатами и сростками с силикатами (до 70 %). Значимую долю составляют силикаты с тонкими включениями (до 20 мкм) пирротина и нерудные минералы – ферромагнетики. В крупном классе во фракциях отмечены единичные сростки пирротина с халькопиритом, сфалеритом и лёллингит-арсенопиритом. В целом они не характерны для данных фракций. Выход магнитной и электромагнитной фракции составляет 90,4 %.

Выход немагнитной фракции составил 10,6 %, в том числе тяжёлой 1,3 %, лёгкой 9,3 %. В составе тяжёлой фракции установлены: пирротин (25 %), марказит-пиритовые агрегаты в сростаниях и самостоятельных выделениях (до 10 %), арсенопирит-лёллингитовые агрегаты (до 2 %), зёрна халькопирита и сфалерита (более 2 %), рутил и титанит (до 2 %), гётит (3 %), единичные чешуйки молибденита, в одном случае установлено Ag. Нерудные минералы тяжёлой фракции (40 %) по данным рентгенофазовой диагностики, оптических констант и микрореакций представлены целым рядом аксессуарных редких минералов: турмалин, апатит, гранат, биотит, диопсид, шпинелиды, силлиманит, монацит, циркон и др. Минеральные фазы Au в пробе методами оптической микроскопии не установлены. Это связано с их ультратонкими размерами (менее 10 мкм). Но минералы, с которыми они ассоциируют (арсенопирит, лёллингит, сфалерит, реже халькопирит) большей частью концентрируются в тяжёлой немагнитной фракции. Немагнитная лёгкая фракция представлена кварцем, полевым шпатом и кальцитом.

Для оценки содержаний полезных компонентов (в том числе Au и Ag) из каждого продукта сепарации и обогащения отобрана навеска по 20 г с последующим истиранием до 0,074 мм, если это было необходимо. Поскольку выход немагнитных фракций (тяжёлой и/или лёгкой) низкий и материала для аналитических определений было недостаточно, то материал по классам крупности был объединён. Для них выполнены анализы методом ICP AS в ИХТРЭМС КНЦ РАН (рис. 3, табл. 5).

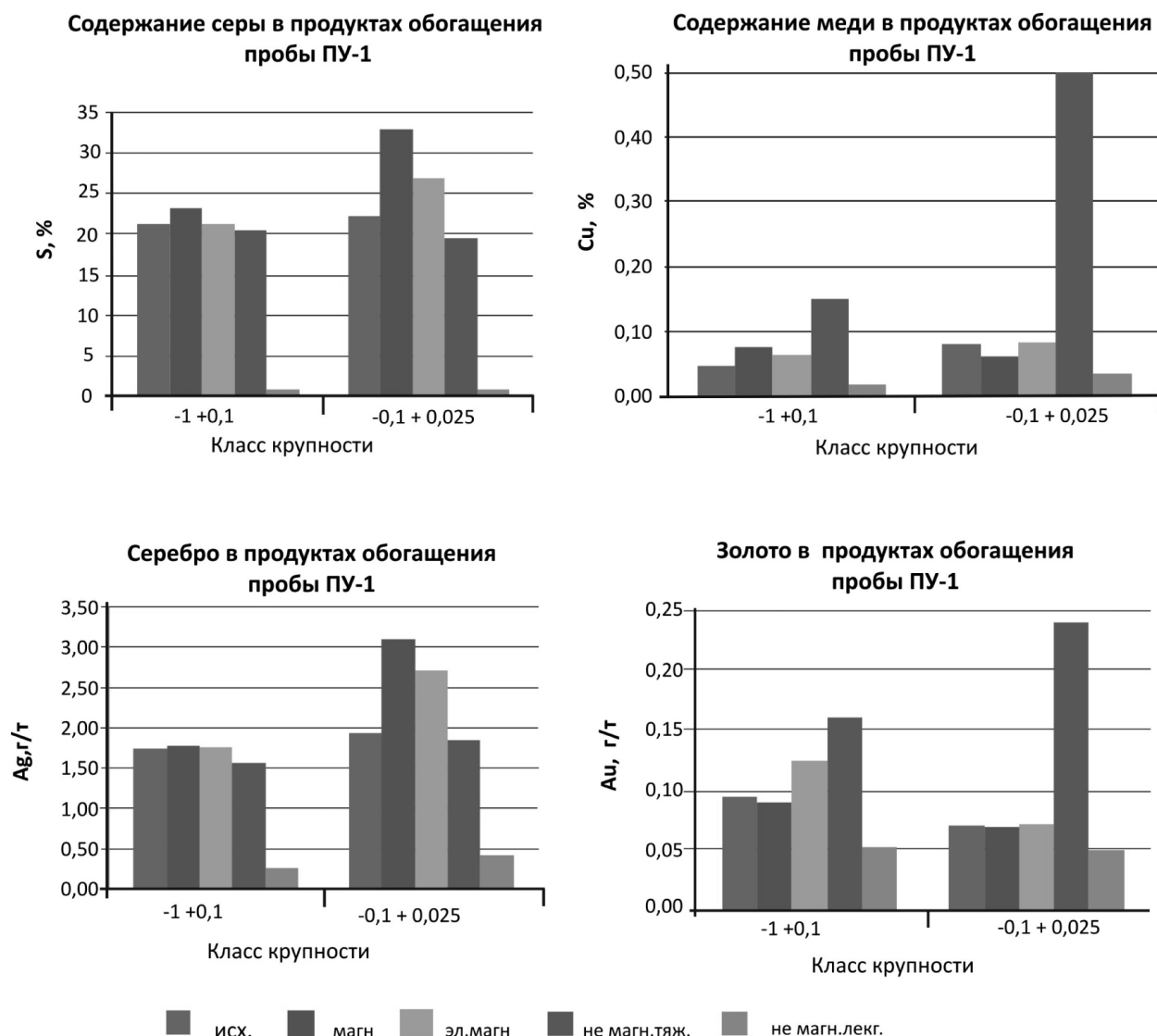


Рис. 3. Результаты обогащения колчеданных руд Пирротинового ущелья

Таблица 5

Результаты магнитной сепарации колчеданных руд Пирротинового ущелья

Наименование продукта	Выход, %	Содержания											
		г/т							%				
		Au	Ag	Pt	Pd	Rh	Ir	Ru	Cu	Ni	SiO ₂	As	Fe _{общ}
Магнитная фракция	58,35	0,188	2,60	0,485	0,83	0,068	0,0079	0,050	0,048	0,066	16,03	0,0338	53,4
Немагнитная фракция	11,50	0,084	0,73	0,466	1,47	0,072	0,0003	0,054	0,051	0,007	71,08	0,0673	1,11
Итого: класс -0,2+0,025	69,85	0,17	2,29	0,48	0,94	0,069	0,0066	0,051	0,048	0,056	25,09	0,0393	44,79
Класс -0,025	30,15	0,114	2,33	0,051	1,03	0,084	0,014	0,053	0,128	0,041	26,94	0,0254	3,73
Итого	100	0,154	2,30	0,35	0,96	0,064	0,0089	0,061	0,072	0,052	25,65	0,0351	32,41

Выводы

Колчеданные руды Имандра-Варзуги и, в частности, Пирротинового ущелья являются типичными представителями докембрийских стратиформных месторождений. Они возникли

одновременно с вмещающими породами, с которыми претерпели длительную историю развития, а на завершающей стадии в ходе регрессивного метаморфизма приобрели эпигенетические черты.

Руды Пирротинового ущелья уникальны по видовому разнообразию минералов. Главные минералы: пирротин, реже пирит; второстепенные: сфалерит, халькопирит, молибденит и галенит. Впервые в российской части Балтийского щита в колчеданных месторождениях Прихибинья установлены прямые признаки благородной минерализации в двух парагенетических ассоциациях: золото-лёллингит-арсенопиритовой и серебро-сульфид-кварцевой. Минералы благородных металлов представлены элементами, теллуридами, сульфидами, стибнидами и Sb-сульфосолями.

Особенность колчеданных месторождений Прихибинья – три типа минерализации: благороднометалльная, ванадиевая и уран-редкоземельная. Ванадиевая проявлена в оксидной (карелианит, кульсонит) и силикатной (мухинит, голдманит, гроссуляр, диопсид) разновременных ассоциациях. Урановая и иттрий-редкоземельная минерализация представлена простыми и сложными оксидами U и Pb, U-Th силикатами, сложными фосфатами и карбонатами Y-REE.

Температура образования пирротин-арсенопирит-лёллингитовой ассоциации 400–450 °C

при активности сульфидной серы 10^{-11} – 10^{-8} . Появление самородного Au, теллуридов Pb и Ag, а также минералов ЭПГ связано с поздними стадиями регрессивного метаморфизма ($T < 300^{\circ}\text{C}$). Они локализируются по реакционной границе арсенопирита и лёллингита. Поздний этап благороднометалльного (главным образом Ag) минералообразования связан с воздействием гидротермально-метасоматических растворов на ранее метаморфизованные колчеданные руды.

Первые опыты по обогащению колчеданных руд Пирротинового ущелья показывают, что Ag коррелируется с S и акцентированно выделяется в магнитный концентрат класса крупности $-0,1+0,025$. В то же время Au коррелируется с Cu и ещё более акцентированно выделяется в немагнитный тяжёлый концентрат того же класса крупности. В более крупных классах распределение элементов не столь выразительно. С другой стороны, в более мелких классах содержится значительная доля общего баланса благородных металлов. Требуются дальнейшие технологические испытания.

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕКУЩИХ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-КОЛЧЕДАНЫХ РУД

Горбатова Е. А., Зарецкий М. В.

ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», lena_gorbatova@mail.ru

Промышленное освоение текущих хвостов обогащения может осуществляться путем их переработки или утилизации. Выбор конкурентных технологических решений зависит от природно-технологических характеристик отходов обогащения, имеющихся финансовых средств и региональных особенностей. Различные решения дают неодинаковый экологический, экономический и социальный эффект.

При обосновании выбора технологических решений основным является разработка минералогических критериев оперативной оценки хвостов обогащения.

Основным критерием возможности вовлечения отходов в переработку является содержание полезных компонентов в текущих хвостах обогащения.

Существует две альтернативные группы способов переработки текущих хвостов обогащения – дофлотация и выщелачивание. Необходимо учесть, что при выборе альтернатив соблюдались следующие требования:

- альтернативы взаимно исключают друг друга;
- альтернативы максимально различаются по выделенным критериям;
- альтернативы одинаково вероятны.

По целому ряду экономических факторов процесс дофлотации предпочтительнее процесса выщелачивания. Этим определяются приоритеты: в первую очередь рассматривается целесообразность дофлотации, если данный процесс нецелесообразен, то рассматривается целесообразность выщелачивания.

К критериям выбора технологии переработки относятся:

- форма нахождения полезного компонента в минералах;
- распределение рудных минералов по классам крупности;
- содержание рудного минерала в полиминеральных сростках;

Для каждой технологии переработки определены критерии эффективности.

Критерии эффективности дофлотации:

- Нахождение рудных минералов в мономинеральных сростках.
- Минеральные сростки открытого типа.
- Наличие трещиноватости и пористости в полиминеральных сростках.

Критерии эффективности выщелачивания:

- Концентрация полезных компонентов в виде самостоятельных минералов.
- Нахождение рудных минералов в мономинеральных сростках.
- Минеральные сростки открытого типа.
- Рудные минералы легкорастворимые.
- Наличие трещиноватости, пористости.
- Отсутствие слоистых силикатов.
- Отсутствие сорбентов.

В том случае, когда переработка текущих хвостов обогащения нецелесообразна, предлагается их утилизация – использование в складочном комплексе, в промышленном или в дорожном строительстве.

В первую очередь рассматривается целесообразность дофлотации, если данный процесс нецелесообразен, рассматривается целесообразность выщелачивания. В том случае, когда нецелесообразно проведение вышеперечисленных процессов, предлагается утилизация сырья.

В соответствии с выбранными приоритетами минералогические критерии можно сформулировать в виде предикатов [1–3], определяющих пригодность текущих хвостов обогащения к процессам переработки или утилизации:

Количество присутствующих в сырье в значимых количествах полезных компонентов $NComp$.

Кондиционное содержание полезного компонента $Cond_i, i = 1, ..., NComp$.

Полезные компоненты образуют самостоятельные минералы и встречаются в виде мономинеральных агрегатов P_1 .

Полезные компоненты образуют самостоятельные минералы и встречаются в виде полиминеральных агрегатов P_2 .

Содержание рудных минералов в крупном классе (+74 мкм) P_3 .

Рудный минерал в полиминеральном сростке является преобладающим P_4 .

Минеральные сростки открытого типа P_5 .

Наличие трещиноватости и пористости в полиминеральных сростках P_6 .

Рудные минералы легкорастворимые P_7 .

Отсутствие слоистых силикатов P_8 .

Отсутствие сорбентов P_9 .

Для хвостов обогащения выполняется следующее неравенство:

$$Con_i < Cond_i, i = 1, ..., NComp, \quad (1)$$

где Con_i – содержание i -го полезного компонента в текущих хвостах обогащения.

Целесообразность переработки текущих хвостов обогащения определяется истинным предикатом:

$$W = \exists i (1 \leq i \leq NComp), Con_i \geq k_i \times Cond_i, k_i < 1, \quad (2)$$

где k_i характеризуют максимальное отличие содержания полезного компонента в текущих хвостах обогащения по сравнению с кондиционным содержанием в рудах. Если предикат (5,2) не выполняется, отходы обогащения подлежат утилизации.

Условие целесообразности проведения процесса дофлотации можно выразить следующим предикатом:

$$Fpos = W \wedge P_3 \wedge (P_1 \vee (P_2 \vee P_4)). \quad (3)$$

Переработка способом дофлотации возможна, если текущие хвосты обогащения характеризуются повышенным содержанием полезных компонентов, приближенным к кондиционному, рудные минералы концентрируются в классе крупности + 74 мкм и образуют мономинеральные сростки, или рудные минералы встречаются в виде полиминеральных сростков и являются там преобладающими. Истинность предиката (3) гарантирует принципиальную возможность дофлотации. Окончательный выбор технологического процесса можно сделать, используя характеристики P_5 и P_6 .

Указанные характеристики независимы, их сочетания можно выразить с помощью четырех предикатов:

$$Q_1 = P_5 \wedge P_6; \quad (4)$$

$$Q_2 = P_5 \wedge \bar{P}_6; \quad (5)$$

$$Q_3 = \bar{P}_5 \wedge P_6; \quad (6)$$

$$Q_4 = \bar{P}_5 \wedge \bar{P}_6. \quad (7)$$

Условие эффективности проведения дофлотации:

$$F_{pract} = F_{pos} \wedge (Q_1 \vee Q_2 \vee Q_3) \quad (8)$$

Эффективность дофлотации возможна, если выполняются условия целесообразности дофлотации (3) и полиминеральные сростки открытого типа и трещиноватые (4) или полиминеральные сростки открытого типа и не трещиноватые (5) или полиминеральные сростки закрытого типа и трещиноватые (6).

В случае, когда установлена нецелесообразность и неэффективность проведения дофлотации, необходимо проверить эффективность проведения процесса выщелачивания. Для этого формулируем дополнительные условия, характеризующие процесс выщелачивания:

$$R_1 = P_7 \wedge P_8 \wedge P_9; \quad (9)$$

$$R_2 = P_7 \wedge P_8 \wedge \overline{P_9}; \quad (10)$$

$$R_3 = P_7 \wedge \overline{P_8} \wedge P_9; \quad (11)$$

$$R_4 = \overline{P_7} \wedge P_8 \wedge P_9; \quad (12)$$

$$R_5 = P_7 \wedge \overline{P_8} \wedge \overline{P_9}; \quad (13)$$

$$R_6 = \overline{P_7} \wedge P_8 \wedge \overline{P_9}; \quad (14)$$

$$R_7 = \overline{P_7} \wedge \overline{P_8} \wedge P_9; \quad (15)$$

$$R_8 = \overline{P_7} \wedge \overline{P_8} \wedge \overline{P_9}; \quad (16)$$

$$R_1 = R_1 \vee R_2 \vee R_3 \vee R_4 \vee R_5 \vee R_6 \vee R_7 \quad (17)$$

Условия, при выполнении которых процесс выщелачивания целесообразен, примут следующий вид (18–20):

$$Al_1 = F_{pos} \wedge Q_4 \wedge R; \quad (18)$$

$$Al_2 = W \wedge (\overline{P_3} \vee \overline{P_4}); \quad (19)$$

$$Al_{pract} = Al_1 \vee Al_2; \quad (20)$$

Таким образом, детерминированная подсистема действует по следующему алгоритму (рис.):

1. На основании результатов лабораторных анализов и экспертных оценок определяются значения исходных величин.

2. Если предикат (2) принимает значение «истина», переходим к п. 3, если «ложно» – де-

лаем заключение, что сырье подлежит утилизации.

3. Если предикат (3) принимает значение «истина», переходим к п. 4, иначе – к п. 5.

4. Определяем истинность предикатов (4) – (8), если предикат (8) принимает значение «истина», делаем вывод, что сырье перерабатывается дофлотацией, иначе – переходим к п. 5;

5. Определяем истинность предикатов (9) – (20), если предикат (20) принимает значение «истина», делаем вывод, что сырье целесообразно выщелачивать, иначе – делаем заключение, что сырье подлежит утилизации.

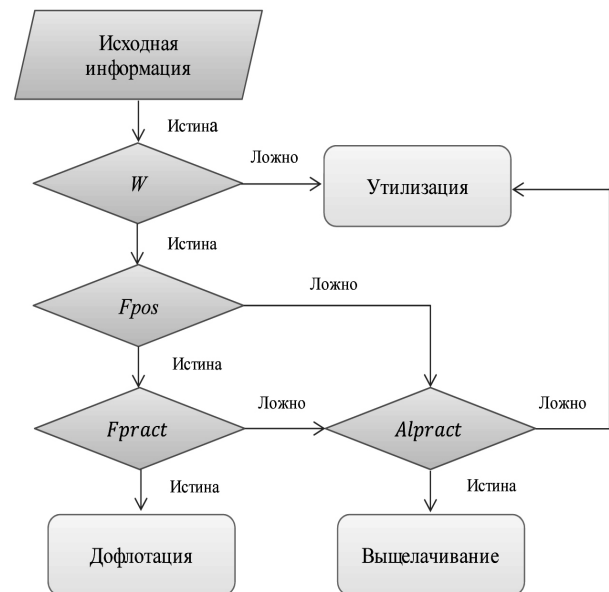


Рис. Алгоритм выбора способа переработки текущих хвостов обогащения

С использованием математической модели описания выбор технологии переработки или утилизации отходов обогатительного передела производится с учетом их технологических характеристик, позволяющих решать проблемы комплексного использования вторичных техногенных ресурсов и защиты окружающей среды от загрязнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарецкий М. В., Шияхметова И. З., Горбатова, Е. А. Гибридная экспертная система в гидрометаллургии // Информационные технологии и системы: материалы Второй Международной конференции. Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2013. С. 157–159.

2. Зарецкий М. В., Дюскина А. И., Горбатова Е. А. Экспертная система в проектировании технологических процессов в гидрометаллургии // Вісник національного

технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ» – 2012. № 62. С. 40–45.

3. Ожогина Е. Г. Горбатова Е. А. Влияние морфоструктурного состава отходов обогащения руд цветных металлов на извлечение ценных компонентов при их гидрометаллургическом переделе // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова, 2012. № 1. С. 10–12.

РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ В СОЗДАНИИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ КАРЕЛИИ

Щипцов В. В., Фролов П. В., Ильина В. П., Попова Т. В., Климовская Е. Е.

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

Введение

Широкий интерес к магнезиальным породам проявился в связи с производством огнеупорных материалов. Металлургическое литейное производство нуждалось в высококачественных огнеупорных материалах, способных выдерживать плавленный металл. Одним из таких огнеупорных природных материалов стал магнезит, так как его основным качественным параметром является высокая термостойкость. Впоследствии спрос на магнезиальное сырье стал расширяться – это сельскохозяйственная, химическая, керамическая (магнезиальная керамика подразделяется на стеатитовую, форстеритовую и кордиеритовую в зависимости от наличия той или иной минеральной фазы в обожженной массе), бумагоделательная, абразивная, строительная, пиротехническая и другие отрасли. Например, в электротехнической промышленности магнезит используется для получения керамики, в качестве наполнителя в трубчатых электронагревателях и т. п. В бумажной промышленности используется как слабощелочной реагент при варке целлюлозы, для обработки бумаги под прессами и как наполнитель пленочных покрытий бумаги и т. д. Помимо магнезита и брусита, на мировом рынке заняли определенные позиции магнезиальные ультрамафитовые образования (тальк, оливиниты, дуниты, перидотиты, серпентиниты), содержащие магнезиальные силикаты – диопсид $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$, энстатит $\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)$, тремолит $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})(\text{OH})_2$, оливин-форстерит Mg_2SiO_4 и ряд других). Интерес представляют безжелезистые разновидности.

Благодаря структурным особенностям и химическому составу магнезиальные силикаты обладают ценными технологическими свойствами, которые позволяют получать изделия с хорошими диэлектрическими и термическими характеристиками, химической стойкостью и инертностью, механической прочностью. Вследствие этого они могут быть использованы в производстве электро- и радиокерамики, керамической облицовочной плитки, пигментов, тепло- и звукоизоляционных материалов.

К традиционным областям использования талька относятся бумажная, лакокрасочная, керамическая и пластмассовая промышленность (около 80 %). В производстве бумаги тальк используется в трех стадиях производственного процесса: в качестве наполнителя бумаги, для абсорбции древесных смол и при покрытии бумаги. Следует сказать, что керамические материалы сейчас рассматриваются как основа научно-технического прогресса во многих отраслях. Применение их разнообразно, вплоть до постройки двигателей внутреннего сгорания. Во многих развитых странах ведутся интенсивные работы по созданию керамики с особыми специфическими свойствами, поиску новых видов сырья, совершенствованию технологии их переработки, получению широкой номенклатуры новых материалов с наименьшими энергетическими затратами [1, 2].

Природные источники магнезиального сырья Карелии и их прикладное значение

С каждым годом возрастает интерес исследователей к высокомагнезиальным комплексам Карелии. Высокомагнезиальные породы характеризуют определенную геохимическую специфику мезо- и неогархей. Эти комплексы стали преобладающими на ранней стадии формирования земной коры, а наиболее ранние продуктивные на высокомагнезиальные промышленные минералы связаны с комплексами коматиит-базальтовой серии зеленокаменных поясов архей (высоко-Mg вулкани-ты) и бонинитоподобными ассоциациями в составе супракrustальных толщ тех же поясов, в которых присутствуют новообразованные минералы по высокомагнезиальным породам – тальк, магнезит и серпентин. В коматиитовых лавах концентрации MgO составляют 24–31 %, достигая 33–39 %. Устанавливается, что в дальнейшем преобладающими становились на кратонной стадии кремнеземистые высокомагнезиальные серии (пикриты, базальты, андезиты), образующие крупные лавовые потоки с огромными роями габброноритовых даек и становлением на этой ста-

дии расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузивов. Например, с тектоническим эпизодом в интервале 2,45–2,43 млрд лет в палеопротерозое в рифтовых структурах произошло формирование крупного расслоенного мафит-ультрамафитового Бураковского интрузива, содержащего в себе такие высокомагнезиальные промышленные минералы как оливин, серпентин. Значительные ресурсы магнезита появляются в серпентиновой части ультраосновного комплекса Светлоозерского месторождения, претерпевшего гидротермальное выщелачивание магнезия из серпентинита. Эти обстановки определили доминирующее положение геохимии архейской среды при рассмотрении перспектив территории Карелии на высокомагнезиальное сырье.

К наиболее изученным месторождениям и проявлениям талька относятся Светлоозерское, Рыбозерское и Игнойльское месторождения. Вмещающими породами выступают серпентиниты и хлоритовые сланцы. К настоящему времени выявлено около 20 месторождений и проявлений талькового камня в центральных районах Карелии и на территории административного подчинения г. Костомукша.

Актуальным и перспективным направлением является оценка расслоенных перидотит-габброноритовых массивов на использование дунитов, оливинитов, серпентинитов, талькового камня и кемиститов гидроталькит-серпентинитового состава в различных областях для производства технических и строительных материалов. Примерами служат крупные линзовидные тела внутри серпентинитовых блоков – Бураковский, Светлоозерский, Тикшеозерский и другие менее крупные массивы.

Тальк-карбонатные породы связаны преимущественно с толщами доломитового состава карельского комплекса. При гидротермальной переработке доломитов происходило образование безжелезистых разновидностей талька, который относится к наиболее ценному сырью для керамического, парфюмерного, медицинского и других производств. Наиболее перспективными для поисков месторождений безжелезистого талька являются доломитовые толщи Северного Приладожья и восточного побережья Онежского озера. Известные на сегодняшний день объекты представляют собой только небольшие линейно-вытянутые зоны мощностью до 0,6 метра. На рис. 1 показано расположение на территории Карелии наиболее важных проявлений и месторождений высокомагнезиальных пород.

Технологическая минералогия является частью прикладной минералогии, исследующей и описывающей все свойства минералов, которые определяют возможность и целесообразность их использования в различных областях [3]. Ее главная задача состоит в повышении полноты и комплексности использования минерального сырья. Важная роль отводится методам технологической минералогии при изучении и оценке магнезиальных образований Карелии на разных стадиях исследований.

К таким образованиям в Карелии принадлежат талькосодержащие породы (железистый тальк и тальковый камень), серпентиниты, дуниты, оливиниты, доломиты.

Результаты научно-прикладных исследований тальковых пород Республики Карелия позволили провести оценку минерально-сырьевой базы талька и талькового камня [4, 5, 6]. В Европейской части России в Республике Карелия сформирована единственная геологическая провинция, где имеются тальковые объекты промышленного значения.

Месторождения и проявления талькового сырья апоультрамафитового генезиса, распространенные в пределах Карельского кратона, включают тальковые руды и тальковый камень. В Финляндии тальк-карбонатные породы широко используются для производства печей и каминов. Талькосодержащие породы карельских месторождений и проявлений (Светлоозерское, Повенчанка, Игнойла и др.) являются аналогичными.

Минеральный состав талькового камня может варьировать в широких пределах, однако основными компонентами являются тальк и карбонат. На основе петрографических и петрохимических исследований тальковых руд вышеуказанных месторождений и проявлений, были выделены четыре главных природных типа [5], характерных почти для всех объектов: I тип – **крупнозернистая порфи-робластовая карбонат-тальковые порода**, II тип – **мелкозернистая с карбонат-тальковая порода**, III тип – **хлорит-(серпентин)-карбонат-тальковая порода**, IV тип – **карбонат-хлорит-тальковая порода**. Для первых двух типов преобладают массивные текстуры, в остальных – сланцеватые и сланцеватополосчатые. Наибольшую распространенность в пределах изученных месторождений и проявлений получили руды I и II типов, **составляющие 2/3 объемов залежей**. Минеральный состав тальковых руд приведен в таблице 1 с данными по карельским и финским объектам. Химический состав породообразующих минералов представлен в таблице 2.

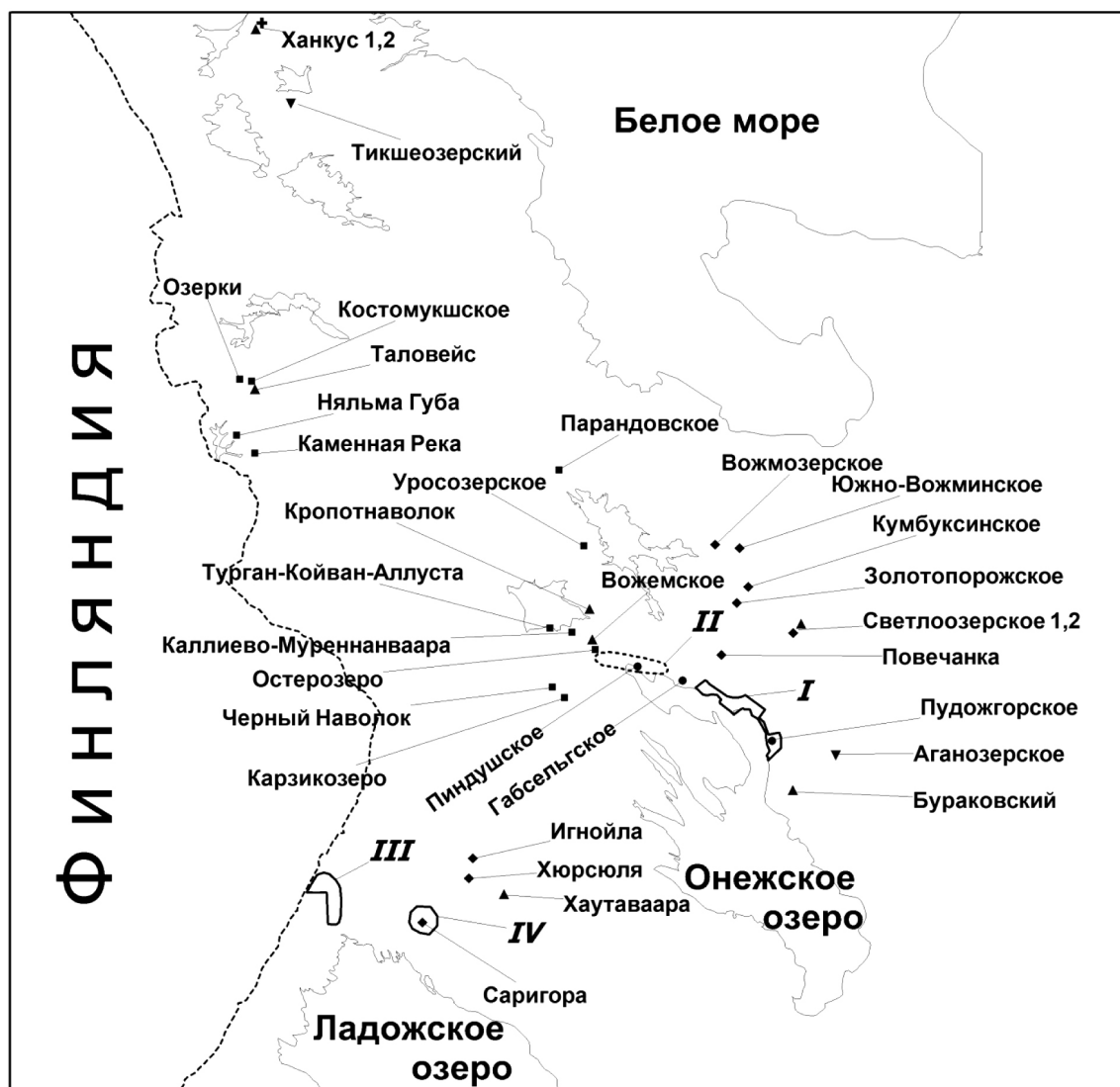


Рис. 1. Схема размещения основных областей и точек высокомагнетизальных месторождений и проявлений на территории Карелии

Условные знаки: а — площади, перспективные для поисков маложелезистого талька; б — проявления маложелезистого талька апокарбонатного типа; с — месторождения и проявления талькового камня апоультрабазитового типа; d — месторождения и проявления тальк-карбонатных руд железистого талька апоультрабазитового типа; е — серпентиниты; f — оливиниты; g — Повенецкий рудный узел с проявлениями рибекит-асбеста; h — антофиллит-асбест

Ведущие зарубежные страны добывают и перерабатывают преимущественно высококачественные маложелезистые апокарбонатные тальковые руды. При переработке руд апоультрамафитового типа (в том числе и талькового камня) применяют высокотехнологичные методы обогащения, которые позволяют получать разнообразные сорта талька, имеющие спрос на мировом рынке (Mondo Minerals Oy/Ab, Финляндия).

Отдельно можно выделить мощные проявления оливинитов, дунитов и оливинового габбро в Тикшеозерском и Елетьзерском субщелочных пироксенит-габбровых с карбонатитами и нефелиновыми сиенитами в массивах на севере Карелии [7]. Здесь геологически и петрографически изучены и описаны многочисленные проявления оливинитов, реже дунитов и оливиновых габбро. Содержание MgO в некоторых оливин-содержащих породах достигает 45 %.

Таблица 1

**Усредненный минеральный состав тальковых руд Карелии
и талькового камня финских месторождений**

Объекты	Содержание минералов, %				
	тальк	карбонат	хлорит	серпентин	магнетит
Светлоозерское месторождение	42–50	35–40	ед. зерна – 14	0–5	5–10
Проявление Игнойла	35–40	30–35	10–15	5–18	5–8
Проявление Повенчанка	45–55	30–40	0–10	0–10	5
Проявление Возмозерское	55–58	23–40	ед. зерна – 11	0–3	1–10
Месторождение Нуннанлахти (Финляндия)	40–50	40–45	5–8	–	до 10
Месторождение Каунискангас (Финляндия)	50–55	40–45	3–5	–	менее 1
Месторождение Юриканиеми (Финляндия)	50–60	30–35	1–2	–	6–8

Таблица 2

Значения химических составов породообразующих минералов

Объект	Породо образующие минералы	Пределы относительных значений химических составов, %					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO+ Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CO ₂
Светлоозерское	магнезит	0–2,11		2,61–9,50		34,81–42,30	52,54–55,69
	тальк	66,25–67,72	Не обн.	0,99–1,70		30,76–32,20	
Хюрсюля	магнезит	0–1,54		7,98–10,20	0–0,89	32,64–36,12	54,23–57,04
	тальк	57,28–67,09	0–1,90	2,36–6,18		30,24–34,64	

Значительные скопления дунитов и оливинитов также фиксируются в Аганозерском блоке Бураковского расслоенного мафит-ультрамафитового массива [8]. Дунитовая подзона ультраосновной зоны серпентинитов центральной части Аганозерского блока по всему разрезу однородна и характеризуется высоким содержанием оливина (88–98 %). Содержание MgO варьирует в пределах 36,97–46,77 % при значительной мощности высокомагнезиальных дунитов (Fo_{85–90}) и аподунитовых серпентинитов [9].

Оливиниты с содержанием оливина 70–90 % присутствуют в центральных частях ультрамафитов Невгозерского, Ортсаярвинского, Каменноозерского и др. массивов (табл. 3).

Оливины обладают высоким содержанием магния, превосходными термоаккумулирующими свойствами, высокой относительной плотностью, стабильным химическим составом, высокой твердостью (6,5–7,0 по шкале Мооса), высокой точкой плавления – 1760°C. Оливин в мировом производстве широко используется в качестве огнеупоров в металлургии железа, в составе формовочных смесей. Намечалась тенденция замены дорогостоящих огнеупоров (графит циркон, хромит), используемых при доводке внутренних поверхностей литейных форм на оливин. Требования предъявляемые к оливину довольно жесткие. Используемое

промышленностью оливиновое сырье не должно интенсивно подвергнуться вторичным изменениям и содержание должно быть не менее 37 % MgO.

Благодаря отсутствию химически связанной воды они являются наиболее ценным сырьем для производства форстеритовых огнеупоров [11]. Минерал форстерит имеет большую анизотропию температурного коэффициента линейного расширения по осям, что обуславливает низкую термостойкость керамики и огнеупоров. Форстерит, после обжига и формирования форстеритовой фазы оказывает определяющее влияние на прочность, термостойкость и химическую стойкость форстеритовой керамики. Форстеритовые огнеупорные изделия обладают следующими свойствами: температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур 20–800°C составляет $11,5 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$; теплопроводность в интервале 500–1000°C – $(1,07 + 5,9) \times 10^{-4} \text{ Вт/(м} \times \text{K)}$; газопроницаемость – 10 Им.

К высокомагнезиальным породам также относятся серпентиниты, содержащие до 38 % оксида магния. Серпентиниты Карелии как тип промышленной породы изучены недостаточно, но современные геологические данные позволяют прогнозировать широкое распространение этих пород [12]. На Аганозерском месторождении хромовых руд выявлены серпентиниты по

высокожелезистым высокомагнезиальным дуни-там. Мощность их по разрезу составляет в среднем около 500 м. Серпентиниты и кемиститы (разновидность разуплотненных серпентинизированных ультраосновных пород) богаты магнием (36–38 %) и содержат незначительное количество примесей Al_2O_3 (0,1–0,5 %) и CaO (0,24–0,5 %) [8]. На Светлоозерском тальк-брейнерит-магнезитовом месторождении содержание MgO в среднем 34 % и малое количество примесей Al_2O_3 (0,2–3 %) и CaO (0–2 %). На других участках (Хаутаваара, Вожемский, Таловейс, Ханкус, Кропотнаволок и др.) отмечены более низкие содержания MgO (25,7–32,35 %) и значительно более высокое содержание Al_2O_3 (3–6 %) и CaO (2,9–5,8 %). По данным РФА серпентиниты участков Хаутаваара, Таловейс и Вожемского, являющиеся продуктами автометаморфического преобразования коматиитов, содержат от 16 до 50 % серпентина. Сопутствующие минералы – хлорит, тремолит, карбонаты. Рудные минералы представлены, главным образом, магнетитом, а также сульфидами железа и никеля.

Нами разработана шихта для получения кордиеритовой керамики с использованием концентрата, полученного после удаления зерен магнетита из серпентинита Светлоозерского месторождения методом двухстадийной магнитной сепарации (содержание оксидов железа снижено в два раза). Основные характеристики керамики находятся в пределах требований к пористым кордиеритовым материалам [13].

На основе серпентинитов Аганозерского месторождения обоснована сырьевая смесь для изготовления пористого теплоизоляционного материала с низкими показателями теплопроводности и высокой влагостойкостью, что позволяет использовать предлагаемую керамику в качестве теплозащитного материала для тепловых агрегатов и морозильных камер [14]. Разработан состав керамической массы для изготовления облицовочной плитки с добавками талькового камня и хлорит-тремолитовых пород [15]. Методами микрозондового и рентгенофазового анализа установлено, что процессы распада и перекристаллизации решетки хлорита, талька, тремолита с образованием тонкодисперсных кристаллических фаз в результате взаимодействия железисто-магнезиальных минералов с глинистыми минералами способствуют повышению прочности керамической плитки. Изучение влияния добавок талькового камня и сопутствующих хлорит-тремолитовых пород Карелии на прочность керамики показало, что эти по-

роды являются перспективными видами минерального сырья [16].

Таблица 3
Химический состав оливинитов Карелии
(масс. %) [10]

Окси-ды	Названия массивов			
	Невг-озерский	Ортсась-ярви	Тикше-озерский	Каменно-озерский
SiO_2	35,01–38,24	36,36–38,85	35,67–38,08	35,32–35,4
TiO_2	0,06–0,2	0,12–0,31	0–0,16	0,15–0,16
Al_2O_3	0,23–3,33	2,78–3,69	0,29–1,18	1,02–1,39
Fe_2O_3	2,86–7,42	4,55–6,79	4,87–7,11	5,82–6,08
FeO	4,67–7,85	4,74–5,91	7,13–7,64	4,69–5,78
MnO	0,11–0,18	0,15–0,19	0,16	0,1–0,12
MgO	38,24–45,46	34,27–42,51	39,29–41,74	40,68–40,95
CaO	до 1,38	0–2,58	0–0,12	0–0,52
Na_2O	до 0,08	0,04–0,11	0,05–0,2	0,11–0,14
K_2O	0–0,05	0,03–0,07	До 0,05	0–0,07
П. п. п.	5,9–10,72	4,11–8,42	6,75–7,77	9,63–10,42
NiO	0,16–0,38	0,24–0,32	0,14–0,32	0,14–0,17
CoO	0,019–0,024	0,02	0,016–0,044	0,02
V_2O_5	0,01–0,037	0,03–0,05	0,016–0,023	сл.
P_2O_5	0–0,29	0,03–0,07	до 0,17	сл.
Cr_2O_3	0,24–0,75	0,71–1,27	0,38–0,47	0,74–0,96

Разработаны составы теплоизоляционных материалов на основе мелких фракций талькосодержащих пород, отобранных из линзообразной залежи в Костомукшском карьере, и связующих компонентов (портландцемент, жидкое стекло, глина). Полученные материалы имеют хорошие теплофизические свойства: коэффициент теплопроводности 0,2 – 0,55 Вт/(м К), морозостойкость – более 35 циклов, термостойкость – более 18 теплосмен. Мелкие фракции отходов, образующихся при получении блоков из талькового камня месторождения Турган-Койван-Аллуста, могут представлять интерес как корректирующая добавка в массу теплоизоляционной керамической плитки и кирпича, имеющих высокую прочность при изгибе (37–39 МПа) [17].

Исследование минерального состава высокомагнезиальных пород и полученных на их основе керамических материалов проводилось с использованием аппаратурной базы Института геологии КарНЦ РАН методами оптической микроскопии, рентгенофазовым анализом, методом комбинационного рассеяния света.

По результатам рентгенофазового анализа, выполненного на дифрактометре ARL X'TRA с из-

лучением $\text{CuK}\alpha$ в области углов $2\theta = 2-90^\circ$, установлено, что кемистит Аганозера содержит (масс. %): серпентин 78–93; гидроталькит до 10,5; пироаурит до 1; хлорит до 3; тальк до 2; кальцит, брейнерит, сидерит до 1,5; биотит до 0,3; магнетит до 2,5; хромит до 0,5; сульфиды до 0,2; гидрогематит до 0,4 (рис. 2). Методом микроанализа показано, что массивный серпентинит Аганозерского месторождения (проба № 323), состоит из хлорита, серпентина, магнетита; а также присутствуют миллерит, апатит, пентландит. Зерна магнетита имеют размеры от 0,01 до 0,2 мм.

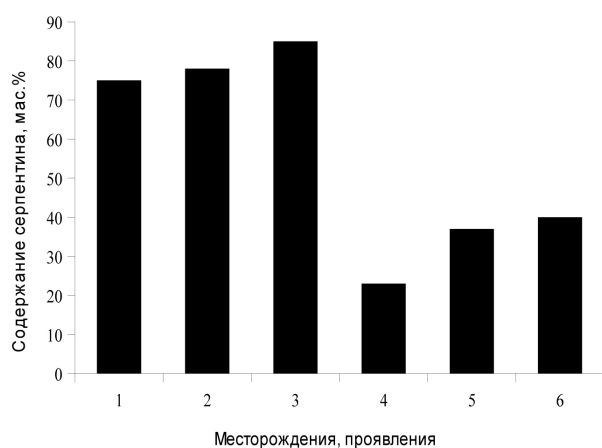


Рис. 2. Среднее содержание серпентина в пробах, отобранных на месторождениях и проявлениях: 1 – Светлоозерское, 2 – кемистит Аганозера, 3 – массивный серпентинит Аганозера, 4 – Хаутаваара, 5 – Таловейс, Костомукшское, 6 – Вожемский участок

Плотностные свойства серпентинитов в значительной степени зависят от температуры их обработки. С ростом температуры обжига до $900-1000^\circ\text{C}$ объемный вес образцов серпентинитов уменьшается, пористость и водопоглощение возрастают, при дальнейшем повышении температуры обработки до 1200°C наблюдается обратная зависимость соответствующих показателей свойств. Кроме того, до 1000°C содержание аморфной фазы возрастает (степень кристалличности уменьшается), при дальнейшем увеличении температуры обработки серпентинитов степень кристалличности за счет перекристаллизации возрастает. Это указывает на то, что температуры около 1000°C являются наиболее оптимальными для спекания образцов из серпентинитов, а мелкие фракции их могут быть использованы для изготовления высокоэффективных пористых изделий методом прессования и последующим обжигом.

Изучен процесс фазообразования при нагревании проб кемистита и серпентинита до 1000°C , с помощью дифференциально-термического анализа, выполненного на синхронном термическом анализаторе STA 449 F1 Jupiter. Процесс превращения серпентина в форстерит сопровождается экзоэффектом в области температур $800-850^\circ\text{C}$. Согласно данным дифференциально-термического анализа, в представленных пробах серпентин, входящий в состав как массивного серпентинита, так и кемистита (Аганозерского месторождения), относится преимущественно к lizardite, а Светлоозерского, Вожемского, Костомукшского объектов – antigorite (рис. 3).

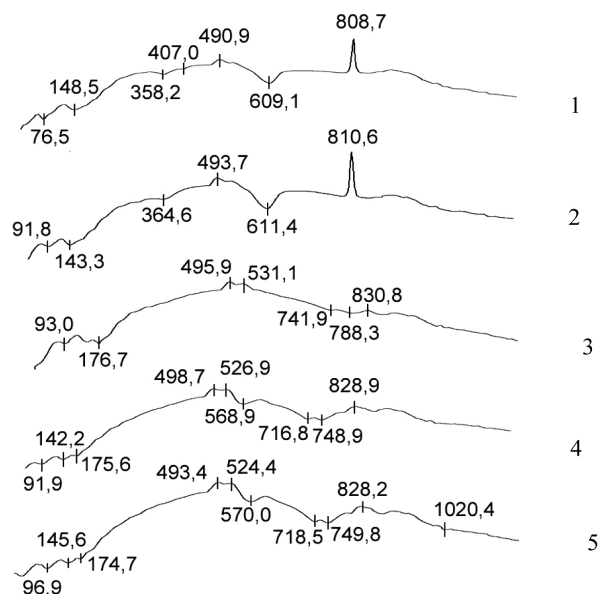


Рис. 3. Дериватограммы серпентинитов разных объектов: 1 – кемистит, Аганозеро, 2 – массивный серпентинит, Аганозеро, 3 – Костомукшское, 4 – Светлоозеро, 5 – Вожемский участок

Химический состав, выбранных для исследования пород приведен в табл. 4. По химическому составу пробы серпентинита и кемистита практически не отличаются. Пробы талькосодержащих пород хлорит-тремолитового состава значительно отличаются по содержанию компонентов, что свидетельствует о разном минеральном составе.

Для создания пористого теплоизоляционного материала использовали кемистит Аганозерского месторождения. Кемиститы представляют собой пелито-дресвяную массу, образующуюся при завершающей стадии серпентинизации ультраосновных пород. Кемистит представлен алевритами от 0,01 до 0,1 мм, а также обломочными зернами песчаных, дресвяных и щебнистых разновидностей пониженной прочности

и повышенной кислоторастворимости. Кемистит состоит из серпентина 80–90 %, карбонатов и гидрокарбонатов – 12 %, хлорита, магнетита,

хромита, сульфидов железа и никеля. По данным РФА кемистит после обжига при 980°C состоит из форстерита – 94,8 % и периклаза – 5,2 %.

Таблица 4

Химические составы пород, масс. %

Проба №	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Cr ₂ O ₃	CO ₂	п. п. п
Серпентинит (пр. 323)	34,06	0,21	0,51	10,02	2,03	0,12	35,69	0,5	0,03	0,02	0,38	0,3	0,57	15,56
Кемистит	32,59	0,02	0,10	9,8	3,38	0,14	37,19	0,24	0,03	0,02	0,42	0,38	0,66	15,03

В качестве отвердителя применяли диатомит озерного происхождения, который относится к аморфным кремнеземистым осадочным породам и характеризуется высокой удельной поверхностью 20,0 – 110,0 м²/г и высокой дисперсностью (гранулы до 110 мкм). В качестве связующего компонента использовали жидкое стекло.

По данным РФА и метода комбинационного рассеяния света показано, что основной кристаллической фазой керамики на основе кемистита, озерного диатомита и жидкого стекла является форстерит. Рентгенофазовый анализ показал, что, кроме форстерита (71 %), присутствуют кварц (5 %), кристобалит (4 %), энстатит (7 %). Количество стеклофазы составляет 13 %.

Перекристаллизация серпентина с образованием форстерита, высокая химическая активность озерного диатомита, обладающего дисперсностью и высокой удельной поверхностью, способствуют повышению прочности теплоизоляционного материала. Формирование пористой структуры материала при обжиге происходит за счет дегидратации химически связанной воды, содержащейся в кемистите и вспучивания жидкого стекла, а также за счет карбонатов и гидрокарбонатов, разлагающихся с выделением CO₂.

Теплоизоляционный материал с форстеритовой кристаллической фазой имеет низкий коэффициент теплопроводности 0,025–0,032 Вт/(м×К), высокую прочность 19,9–24,66 МПа и хорошую влагостойкость. По сравнению с известным теплоизоляционным материалом на основе пыли от обжига вермикулитового концентрата, его механическая прочность выше в 8–15 раз, влагостойкость в 32 раза, а коэффициент теплопроводности ниже в 2,2–2,8 раза. Указанные свойства обеспечивают высокие эксплуатационные и технологические характеристики полученного пористого теплоизоляционного материала с форстеритовой кристаллической фазой.

В настоящее время ведутся работы по изучению возможностей применения серпентинизированных ультрамафитов Карелии в триботехнике. Предварительные испытания, в частности серпентинизированных перидотитов (проба А-307) и пироксентиов (проба А-308) Аганозера, на машине трения (ООО «НИЛ «Триботех»»), показали, что добавка в масло нескольких грамм измельченной до 40 мкм породы каждой из проб в несколько раз снижает коэффициент трения на поверхностях соприкосновения. Кроме того, в местах повышенного износа создается устойчивая «керамическая» корка, впитывающая и удерживающая масло. Наилучшие результаты дает купажируемая смесь серпентинизированных перидотитов и пироксениов, что частично апробировано на автомобильных двигателях внутреннего сгорания.

По химическому составу серпентиниты Светлоозерского и Аганозерского месторождений пригодны для использования в качестве биологической защиты ядерных реакторов, а предварительные исследования серпентинитов участка Хаутаваары указывают на перспективность их применения для сварочного дела [4].

Выводы

Территория Карелии представляет практический интерес на высомagneзиальное сырье для использования в промышленности. Потенциал минерально-сырьевой базы велик по той причине, что здесь нижний срез земной коры существенно представлен magnезиальными породами. Определенным толчком может послужить программа по оценке и развитию минерально-сырьевой базы Пудожского и сопряженного с ним Медвежьегогорского района, так называемый «Пудожский мегапроект». В статье показаны первые результаты исследований высокомagneзиальных пород и минералов для создания новых дефицитных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нетрадиционные виды нерудного минерального сырья // под редакцией У. Г. Дистанова, А. С. Филько. Москва: Недра, 1990. 261 с.
2. Прокофьева В. В. Магнезиальные силикаты в производстве строительной керамики. СПб.: Стройиздат, 2005. 157 с.
3. ИЗОИТКО В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. Санкт-Петербург: наука, 1997, 532 с.
4. Ильина В. П., Попова Т. В., Фролов П. В. Высокомагнезиальное сырье Карелии и перспективы его использования // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 190–196.
5. Щипцов В. В. Магнезиальное сырье: история, мировой потенциал и ресурсы Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 45–61.
6. Щипцов В. В., Ильина В. П., Попова Т. В., Фролов П. В. Высокомагнезиальные промышленные минералы и горные породы Карелии в потенциальном производстве огнеупоров и керамических материалов различного назначения // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 4–5, С. 40–46.
7. Богачев А. И., Зак С. И., Сафронова Г. П., Инина К. А. Геология и петрология Ельтозерского массива габброидных пород Карелии. М.; Л.: Наука, 1963. 159 с.
8. Горошко А. Ф. Новый геолого-промышленный тип месторождений комплексного никель-магнезиального сырья в ультрамафитах Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 1. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 24–35.
9. Лавров М. М., Голубев А. И., Трофимов Н. Н. Геохимия и рудоносность Бураковской расслоенной интрузии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 75–92.
10. Лавров М. М. Гипербазиты и расслоенные перидотит-габбро-норитовые интрузии докембрия Северной Карелии. Л., Наука, 1979. 136 с.
11. Хорашавин Л. Б. Форстерит. Справочник. М., «Теплотехник», 2007. 368 с.
12. Фролов В. П., Лебедева Г. А., Ильина В. П. и др. Геологическая и минералого-технологическая предварительная оценка различных формационных типов серпентинитов Карелии // Минералого-технологическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов. Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, 2011. С. 147–158.
13. Патент № 2458886 РФ, МПК СО4В 35/195. Шихта для получения кордиеритовой керамики // Лебедева Г. А., Попова Т. В., Ильина В. П., Щипцов В. В. Оpubл. 20. 08. 12, Бюл. № 23. 1 с.
14. Патент № 2497774 РФ, МПК СО4В 33/132 // Сырьевая смесь для изготовления пористого теплоизоляционного материала. Ильина В. П., Щипцов В. В., Фролов П. В. Оpubл. 10. 11. 13, Бюл. № 31. 2 с.
15. Патент № 2446130 РФ, МПК СО4В 33/132. Керамическая масса для изготовления облицовочной плитки // Ильина В. П., Лебедева Г. А., Щипцов В. В. Оpubл. 27.03.12, Бюл. № 9. 2 с.
16. Ильина В. П., Лебедева Г. А. Влияние талькового камня и хлорит-тремолитовых пород на фазовый состав и свойства керамической плитки. // Стекло и керамика, 2011, № 11. С. 40–45.
17. Ильина В. П. Керамический теплоизоляционный материал на основе серпентинита // Стекло и керамика. 2013. № 8. С. 24–27.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ МЕТАЛЛОНОСНЫХ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ ПАЛЕОГЕНА УЗБЕКИСТАНА

Турсебеков А. Х.¹, Шарипов Х. Т.², Василевский Б. Б.³, Исоков У. М.³

¹Институт геологии и геофизики АН РУз,

²Ташкентский химико-технологический институт,

³Институт минеральных ресурсов Госкомгеологии РУз, г. Ташкент

Палеогеновые горючие сланцы (ГС) являются гетерогенной органогенно-глинисто-оксидно-карбонатно-фосфатно-сульфидной системой, в которой вещество представлено микро-, тонко-, нанодисперсной системой. Она формировалась в морском бассейне в течение миллионов лет, пройдя длительный путь своего образования: молекулярные растворы → коллоиды → золи → гидрогели →

гидрозоли → минерал – путь от аморфизированного состояния вещества до кристаллического.

Большинство неорганических соединений горючих сланцев (аморфно-кристаллические), состоящих из глинистых минералов, опала, халцедона, пирита, марказита и др., являются простыми структурами и их можно интерпретировать на базе элементарной ячейки (глинистые минералы, апатит,

пирит, марказит и др.) как содержащими небольшое число атомов. Органическое вещество, находящееся совместно с неорганическим веществом, состоит из органических соединений, сложенных из огромных молекул, каждая из которых содержит до 1000 атомов. В силу этих причин органические соединения обладают бесконечным разнообразием состава и молекулярных структур. В этой сложной органогенно-неорганогенной геохимической системе могли образоваться не только органические соединения (кероген, битумы, аминокислоты и др.), но и «промежуточные» металлоорганические и органоминеральные соединения. Эта сложная система органической геохимии детально рассмотрена в фундаментальных исследованиях В.И.Вернадского, А.П.Виноградова, Я.Э.Юдовича, М.П.Кетрис и др., поэтому в данной статье не рассматривается.

Первоначально твердое вещество горючих сланцев представляло аморфное (некристаллическое вещество), которое возникло из очень вязкой жидкости (пересыщенный раствор). По своему состоянию аморфное вещество термодинамически неустойчиво. При уплотнении и диагенезе в конечном счете переходит в кристаллическое состояние. В первый момент возникновения зародыши химического соединения, вследствие своих небольших размеров (в отличие от более крупных), имеют высокую поверхностную энергию и являются неустойчивыми по отношению к другим состояниям вещества. Размер кристаллического зародыша представляет собой функцию величины степени пересыщенности раствора, при этом зародыш легче формируется при увеличении степени пересыщения, при этом высокая степень пересыщения ведет к образованию множества мелких кристаллов, тогда как небольшое пересыщение выражается в формировании более крупных кристаллов. Из этого следует, что горючие сланцы формировались из пересыщенных растворов и создали архитектуру тонкодисперсной системы. Присутствие в горючих сланцах аморфных веществ указывает на незавершенность процесса диагенеза осадков.

По происхождению наиболее распространенные минеральные образования горючих сланцев можно подразделить на несколько групп по Г. Аррениусу [1]:

1. Терригенные (литогенные), реликты минералов (магматические, вулканогенные и др.), поступившие в осадок за счет перемыва и переотложения данных образований;

2. Гидрогенные (аутигенные) минеральные соединения, образованные из растворенных веществ в морских условиях;

3. Биогенные минералы в горючих сланцах, представленные опалом, кальцитом и фосфатсодержащими обломками костей и зубов рыб и др., образующих важную часть морских отложений.

Доказано, что в результате процессов химического выветривания составляющие минералы магматических пород растворяются и переходят в ионные растворы, а гидрогенные минералы (гидрослюда, монтмориллонит и др.), видимо, образуются, путем выпадения в осадок из таких растворов. Известно, что монтмориллонит, аллофан, цеолиты образуются при разложении пепла и вулканических стекол в морском бассейне. Другим гидрогенным компонентом горючих сланцев являются гидраты железа (гетит, гидрогетит), которые представлены микроскопическими агрегатами, рассеянными в осадках. Предполагается, что образование гидроокиси железа в морской воде происходит за счет каталитического окисления ионов железа. При коагуляции коллоидных частиц в морской воде они выпадают в осадок в виде гидрогеля. К гидрогенным минералам горючих сланцев относится и апатит, который образовался в мелководном морском бассейне из фосфатных ионов, находившихся в растворе, главным образом, посредством замещения кальцита, который аналогичным путем замещается доломитом. Апатит нестабилен для глубоководных морских отложений, образовавшихся при низкой температуре воды и высоком потенциале CO_2 , и апатитовые скелетные остатки на океаническом дне медленно переходят в раствор. Из этого следует, что апатиты горючих сланцев формировались в неглубоком бассейне.

Из-за своей специфической кристаллохимической структуры и размерности частиц, тонкодисперсный апатит обладает такой поверхностью, которая благоприятна для адсорбции и захвата редкоземельных, урановых и ториевых элементов. Гидрогенный барит в горючих сланцах встречается спорадически в виде образованных эвгедральных кристаллов от 3 до 50 мкм. Большая скорость накопления барита в зонах органической деятельности обусловлена возрастанием концентрации сульфатного иона и последующего окисления сульфидов.

Ряд исследователей занимались изучением минерального состава горючих сланцев палеогена [2, 3].

При изучении и оценке рудоносных сланцев и их технологичности нами особое внимание было уделено их принадлежности к определенным уровням организации вещества. Для этого была использована методика структурно-парагенетического анализа комплексных по вещественному составу и строению рудоносных горючих сланцев. Таким образом было установлено, что по составу и строению они относятся к категории гетерогенных систем с многоуровневой иерархической структурой организации вещества, которые отражены в закономерностях

распределения элементов в минеральных образованиях и разнообразием минеральных форм и ассоциаций. Время образования горючих сланцев, комплексность и уровень организации вещества (макро-, микроминералы, аморфные вещества, наночастицы) способствовали созданию разнообразных минералов, их разновидностей с учетом изоморфизма, сорбции, десорбции и т. д. Полученные данные по уровню организации вещества в горючих сланцах позволяют по новому оценить их технологические свойства (табл. 1).

Таблица 1

Уровень организации вещества рудоносных горючих сланцев палеогена

Уровень			Вещественно представленная система	Вещественная характеристика неоднородности	Влияние уровня организации вещества на технологические свойства рудоносных горючих сланцев
Организация веществ	размерный	Строение			
Микросистема	$10^{-1} \cdot 10^{-4}$	Микроскопический	Минеральный агрегат рудоносных горючих сланцев	1. Терригенные минералы: кварц, полевые шпаты, плагиоклаз. 2. Гидрогенные (аутигенные) минералы (монтмориллонит, гидрослюда, каолинит, гидроокислы железа, пирит, марказит и др.	Неизвлекаемые минералы методом гравитации и флотации. Возможно химическое, бактериальное, чанное выщелачивание или их комбинации
Микро-наносистема	$10^{-4} \cdot 10^{-9}$	Микроультратонкодисперсный	То же	Аморфные, гидрогели, коллоидные вещества (опал, халцедон, аллофан и др.), наночастицы, изоморфные примеси	То же

В табл. 2 приводится минеральный состав горючих сланцев месторождений Байсун и Сангун-

тау, списочный которых составляет 61 минерал и минеральные разновидности.

Таблица 2

Минеральный состав горючих сланцев, г/т

Минерал	Процентный состав в месторождении Байсун	Минерал	Процентный состав в месторождении Сангунтау
Сумма глин	46,6	Сумма глин	47,0
Монтмориллонит	43,7	Монтмориллонит	27,7
Гидрослюда	51,9	Гидрослюда	38,5
Каолинит	4,4	Хлорит	0,8
Кальцит	2,6	Цеолит	0,9
Доломит	2,4	Кальцит	4,9
Пирит (марказит)	2,4	Доломит	1,9
Гипс	0,3	Апатит	1,5
Цеолит	0,8	Пирит (марказит)	2,6
Гетит	0,2	Каолинит	4,0

Глинистые минералы. Главными минералами горючих сланцев служат глинистые минералы (гидрослюда (иллит), монтмориллонит, каолинит, хлорит и аллофан), а также кварц и полевые шпаты, поэтому в горючих сланцах наблюдаются высокие содержания SiO_2 , Al_2O_3 . Высокие содержания кремнезема не только зависят от присутствия терригенного кварца, но из-за присутствия опала, аллофана, стекла, которые образовались за счет раковин и вулканического пепла.

Подавляющая часть глин имеет смешанный минеральный состав. Смешение минералов происходит при их переносе и отложении, когда к продуктам выветривания, образовавшимся в одной среде, примешиваются глинистые минералы, образовавшиеся в другой среде, а также продукты механического размельчения. Смешению способствует и то, что глинистые минералы, попадая во время переноса и после отложения в новую среду, образуют новые разновидности. Поэтому при изучении глин особенно важно определить их минеральный состав, что относится к непростой задаче. Разрешить ее полностью не удалось микроскопическим способом, вследствие тонкодисперсности и нахождения их в сложной смеси глин.

Ниже приводятся материалы по наиболее распространенным минералам горючих сланцев (табл. 3, 4, рис. 1).

Данный вопрос был решен с помощью рентгенофазового и микрозондового анализа. В горючих сланцах Байсуна, кроме этих минералов, присутствуют по возрастающей степени кварц, калиевый полевой шпат, плагиоклаз, что составляет в сумме 45,2 %. Минералы глин даются в процентном отношении по их преобладанию в глинах. В горючих сланцах Сангрунтау сумма кварца, калиевого полевого шпата, плагиоклаза составляет 40,4 %.

Глинистые минералы, в основном, тонковолокнистые образования. Кристалличность, по данным рентгенофазового микрозондового анализа, в больших пределах от кристаллических фаз вплоть до аморфных (рис. 1). Размер частиц колеблется от $> 0,2$ мкм и относится к микро, ультрадисперсным системам.

Монтмориллонит является представителем трехслойных глинистых минералов: один октаэдрический слой в них расположен между двумя тетраэдрическими слоями. Решетка монтмориллонита образована гиббситовым слоем, заклю-

ченным двумя тетраэдрическими слоями и отвечает теоретической формуле $\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{17}$. Полученные результаты исследований монтмориллонитов горючих сланцев не вписываются в теоретическую формулу. Поэтому состав монтмориллонита был уточнен и соответствует формуле $(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Fe}^{3+})_4(\text{Si}, \text{Al})_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Вследствие замещения ионов в монтмориллоните появляется дефицит положительного заряда, вызывающий интенсивную адсорбцию катионов на поверхности и ребрах глинистых чешуек. По этой причине монтмориллонит обнаруживает высокую степень ионного обмена с окружающим раствором. Гидрослюда (иллит) имеет структуру, подобную структуре монтмориллонита, но с замещением части кремния в тетраэдрических слоях алюминием, что уравновешивается присутствием прочно удерживаемых ионов калия, которые расположены между трехслойными пакетами.

Присутствие калия не дает возможности молекулам воды проникнуть между слоями, поэтому этот минерал относится к неразбухающим глинистым минералам. Количество калия в решетке гидрослюды испытывает колебания от 7,1 до 9,01 %, и формула минерала может быть написана в виде $(\text{K}_{0-2}\text{Al}_4(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$. Микрозондовые исследования гидрослюд горючих сланцев показали, что теоретическая формула требует корректировки, так как в них присутствует Ca (от 0,2 до 2,6 %), Fe (от 0,6 до 7 %), Mg (от 1,1 до 4,2 %).

Формула гидрослюды (иллита) будет выглядеть следующим образом $(\text{K}_{0-2}, \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Al}_4)(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{20}(\text{OH})$.

Глауконит, присутствующий в горючих сланцах, является разновидностью гидрослюды, в которой часть алюминия в октаэдрических слоях замещена окисью железа.

Хлориты относятся к магнезиально-железистым лептохлоритам и имеют трехслойную ячейку. Замещение ионов проявлено в хлоритах очень широко, поэтому общая формула хлоритов горючих сланцев следующая: $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4(\text{Mg}, \text{Al})_3(\text{OH})_6$ железисто-магнезиальные лептохлориты. Хлориты обладают высокой способностью к ионному обмену и не разбухают.

Каолинит – двухслойный глинистый минерал. Его структура образована повторяющимися элементарными ячейками, состоящими из одного тетраэдрического слоя гиббситового типа, и укладывается в формулу $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_6$.

Каолинит относится к неразбухающим минералам, ионы алюминия и кремния в его слоях замещаются в очень малой степени. Следует отметить, что глинистые минералы, присутствующие в горючих сланцах, имеют слоистую структуру, поэтому обычным оказывается и присут-

ствие смешанно-слоистых глин, состоящих из беспорядочно или закономерно чередующихся слоев, принадлежащих двум и более различным самостоятельным минералам (монтмориллонит–гидролюда). Такие минералы по номенклатуре относятся к смектитам.

Таблица 3

**Классификация минералов и степень их распространенности
в горючих сланцах месторождения Сангунтау**

Класс	Минерал	Формула	Степень распространенности
Алюмосиликаты	Глауконит	$K(Fe, Al)_3 [AlSi_3O_{10}] (OH)_2 \times nH_2O$	+
	Ортоклаз	$KAlSi_3O_8$	+++
	Альбит	$NaAl_3Si_3O_8$	++
	Биотит	$K(Mg, Fe)_3 AlSi_3O_{10}(OH)_2$	+
	Монтмориллонит	$(Al, Mg, Fe)_4 (Al, Si)_8O_{20}(OH)_4$	+++
	Гидролюда (иллит)	$K_{0-2} Al_4 (Al, Si)_8O_{20}(OH)_4$	+++
	Хлорит	$(Mg, Fe)_3 [(OH)_2]$	+
	Тюрингит	$Fe_4 (Al, Fe) [Al_2Si_2O_{10}] (OH)_6$	+
	Делессит	$(Mg, Fe)_3 [(OH)_2] Al_{0-0,9}Si_4O_{10}$	+
	Каолинит	$Al_4Si_4O_{10} (OH)_8$	+++
	Ломонтит	$Ca[AlSi_2O_6] \times 4H_2O$	+
Силикаты	Кварц	SiO_2	+++
	Опал (халцедон)	$SiO_2 \times nH_2O$	+++
	Аллофан	$mAl_2O_3 \times pSiO_2 \times n \times H_2O$	++
	Циркон	$Zn [SiO_4]$	+
	Титанит	$CaTi [SiO_4] O$	+
	Аламосит	$Pb_{12} [Si_{12}O_{36}]$	+
Окислы	Гетит	$FeOOH$	+++
	Аллюмогетит		
	Гидрогетит		
	Бемит	$AlOOH$	+
	Эсколаит	Cr_2O_3	+
	Шеелит	$CaWO_4$	+
	Касситерит	SnO_2	+
	Повелит	$Ca[MoO_4]$	+
	Повелит-вульфенит	$CaPb [MoO_4]$	+
	Рутил	TiO_2	+
	Титаномагнетит	$TiFeFe_2O_4$	+
Фосфаты-сульфаты	Ардилит	$Ca_2SO_4 \times 2H_2O$	++
	Диадохит	$Fe_4 [(OH) / PO_4SO_4]_3$	++
	Апатит	$Ca [PO_4SO_4Cl]$	+++
	Гипс	$CaSO_4 \times 2H_2O$	++
	Ангидрит	$CaSO_4$	+
	Барит	$BaSO_4$	+
	Целестин	$SrSO_4$	+
	Мелантерит	$FeSO_4 \times 7H_2O$	+
	Карбонаты		
Карбонаты	Кальцит	$CaCO_3$	+++
	Доломит	$MgCaCO_3$	++
	Розазит	$(CuZn)_2 [(OH)_3 / CO_3]_2$	+
	Малохит	$Cu_2[OH / CO_3]_2$	+

Класс	Минерал	Формула	Степень распространенности
Хлориды	Сильвин	KCl	+
	Органическое вещество	C	+++
Сульфиды	Пирит (марказит)	FeS ₂	+++
	Халькопирит	CuFeS ₂	+
	Сфалерит	ZnS	+
	Минерал «х»	(Pb, Fe, Zn) S	+
	Галенит	PbS	+

Примечание. +++ очень много; ++ много; + редкие

Кроме вышеперечисленных глинистых минералов, в горючих сланцах присутствует аллофан, который является плохо раскристаллизованным аморфным веществом с формулой $m \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot p \cdot \text{SiO}_2 \cdot n \cdot \text{H}_2\text{O}$, образование которого тесно связано с каолинитом, монтмориллонитом и гидрослюдами. Образованию аллофана и монтмориллонита благоприятствует наличие вулканического материала.

Монтмориллонит и гидрослюда образовались в морских условиях в щелочной среде. Каолинит, привнесенный с суши, в морских условиях медленно, но устойчиво переходит в гидрослюда и хлорит. Присутствие незначительного количества каолинита в горючих сланцах (до 4,4 %) объясняется двумя причинами: отсутствием источника, богатого каолинитом, и переходом его в гидрослюда и хлорит в морских условиях. Чрезвычайно важным свойством глинистых минералов является их сильно выраженная способность ионного обмена с окружающей средой. Наиболее легко подвергаются обмену катионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} и Fe^{2+} и анионы PO_4^{3-} – SO_4^{2-} – Cl^- . Это свойство глинистых минералов имеет колоссальное значение для живого вещества. Оно является основой земледелия.

По данным микрозондирования впервые систематизированы материалы по химическому составу глинистых минералов и их смешанных аналогов для горючих сланцев Сангрунтау и Байсуна.

Главными и составными частями глинистых минералов горючих сланцев являются SiO_2 (до 61 %) и Al_2O_3 (до 31 %). К постоянному компоненту относится K_2O (до 10 %) и отмечается отсутствие Na_2O . Кроме этого, присутствует значительное количество SiO_2 (до 9 %), H_2O до (5–20 %), TiO_2 (до 2,9 %), Fe_2O_3 (до 9 %), MgO (до 4,2 %), CaO (до 4,5 %). Кроме вышеперечисленных компонентов, глинистые минералы обогащены вана-

дием (от 0,05 до 1,3 %), марганцем (от 0,05 до 1,7 %), ураном (от 0,06 до 0,8 %), торием (от 0,04 до 0,4 %), молибденом (от 0,1 до 0,9 %), медью (от 0,2 до 0,6 %), цинком (от 0,6 до 0,8 %), никелем (от 0,05 до 0,4 %), лантаном (от 0,1 до 8 %), церием (от 0,1 до 0,4 %), иттербием (от 0,1 до 0,6 %), иттрием (от 0,1 %), барием (от 0,2 до 3,9 %). Кроме перечисленных выше глинистых минералов, в горючих сланцах присутствуют и другие минералы (глауконит, хлориты, аллофаны).

Хлориты по отношению Si:Fe относятся к лептохлоритам (тюрингит и делесит), в которых выявлены некоторые количества V, U, Th и Ti. Аллофаны – аморфные силикаты алюминия и кремния. В них установлены V (0,1–1,3 %), As (до 1,9 %), в глауконите V (0,5–6,0 %), Ti (0,3–0,7 %), U (до 0,1 %), Yb (до 0,6 %), Y (до 0,2 %), Th (до 0,5 %).

В заключение следует отметить важную роль глинистых минералов в горючих сланцах в концентрации промышленно-ценных элементов: V, Mo, U, Re, Ni, редкоземельных и др.

В органическом веществе, по данным микрозондирования, впервые установлены ценные элементы, %: V (0,1–0,3 %), U (0,1–0,3 %), Yb (0,1–0,9 %), Y (до 0,3 %), Ce (до 0,4 %) и SO_3 (0,2–26,9 %). Присутствие значительных содержаний SO_3 указывает на высокую сернистость горючих сланцев.

Опал (халцедон), весьма распространенный минерал горючих сланцев палеогена, является твердой гидрогелем, аморфный. Содержание SiO_2 теоретически может достигать до 99 %. Содержание воды меняется от 1 до 4 %, редко составляет 13–20 %. Элементами-примесями являются (%): Al (2,6), CaO (3,8), SO_3 (6,1), Fe (2,0), K (0,4), Na (1,3), Ti (0,1), V (0,5), Mo (2,37), Pb (6,0).

Повышенное содержание ряда элементов: Ba, Al, Ca, SO_3 , Pb, Mo, K, Na, Ti, V объясняется присутствием примесей глинистых минералов, вульфенита, барита и др. минералов. Опал с высоким

содержанием SO_3 (до 8,6 %) – сульфат, содержащий разновидность опала с содержанием CaO (5,5 %), относится к алюмокальциту, с содержанием Al_2O_3 (3,2 %) относится к лярдиту.

Таблица 4

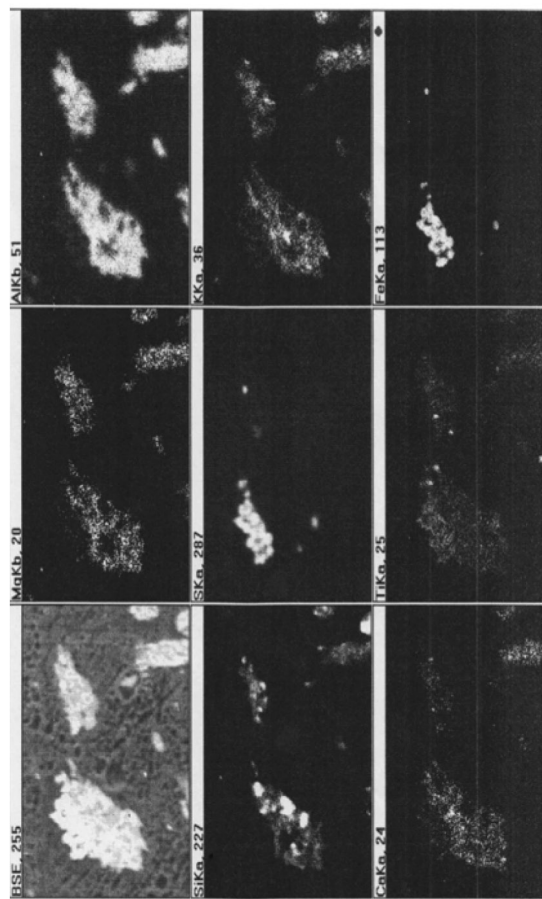
Классификация минералов и степень их распространенности в горючих сланцах месторождения Байсун

Класс	Минерал	Формула	Степень распространенности
Алюмосиликаты	Ортоклаз	KAlSi_3O_8	+++
	Альбит	$\text{NaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	+++
	Биотит	$\text{K}(\text{Mg, Fe})_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	+
	Монтмориллонит	$(\text{Al, Mg, Fe})_4(\text{Al, Si})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \times n \times \text{H}_2\text{O}$	+++
	Каолинат	$\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	+++
	Гидролюда	$\text{K}_{0-2}\text{Al}_4(\text{Al, Si})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	+++
	Хлорит	$(\text{Mg, Fe})_3[(\text{OH})_2 / \text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	+
	Тюрингит	$(\text{Fe}_5\text{Al})(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	+
	Клементит	$\text{Fe}_4(\text{AlFe})_3[(\text{OH})_2 / \text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	+
	Гриналит	$(\text{Fe}) < [(\text{OH})_8 / \text{Si}_4\text{O}_{10}]$	+
Силикаты	Кварц	SiO_2	+++
	Опал (халцедон)	$\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$	+++
	Аламазит	$\text{Pb}_3[\text{SiO}_4]\text{O}$	+
Окислы	Гетит	FeOOH	+++
	Гидрогетит		+++
	Бемит	AlOOH	+
	Минерал «X»	$(\text{Mo, CoNi})\text{O}_3$	+
	Гидротунгстит	$\text{WO}_2(\text{OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O}$	+
	Плантерит	PbO_2	+
	Повелит	$\text{Ca}[\text{MoO}_4]$	+
	Молибдит	MoO_3	+
	Хромит	$(\text{Mg, Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$	+
	Тунгстит	$\text{WO}_2(\text{OH})_2$	+
	Минерал «X»	$(\text{CuZn})\text{O}_2$	+
Фосфаты	Апатит	$\text{Ca}(\text{PO}_4\text{SO}_4)$	+
	Колофанит (фосфорит)	$\text{Ca}(\text{PO}_4\text{SO}_3)$	+
Карбонаты	Розазит	$(\text{CuZn})[(\text{OH})_3 / \text{CO}_3]_2$	+
	Кальцит	CaCO_3	+++
	Доломит	CaMgCO_3	++
Сульфаты	Гипс	CaSO_4	+
	Барит	BaSO_4	+
Сульфиды	Пирит (марказит)	FeS_2	+
	Сфалерит	ZnS	+
	Галенит	PbS	+
Интерметалид		Fe, Mo, W, V	+
Самородные		Mo	+
		Zn	+

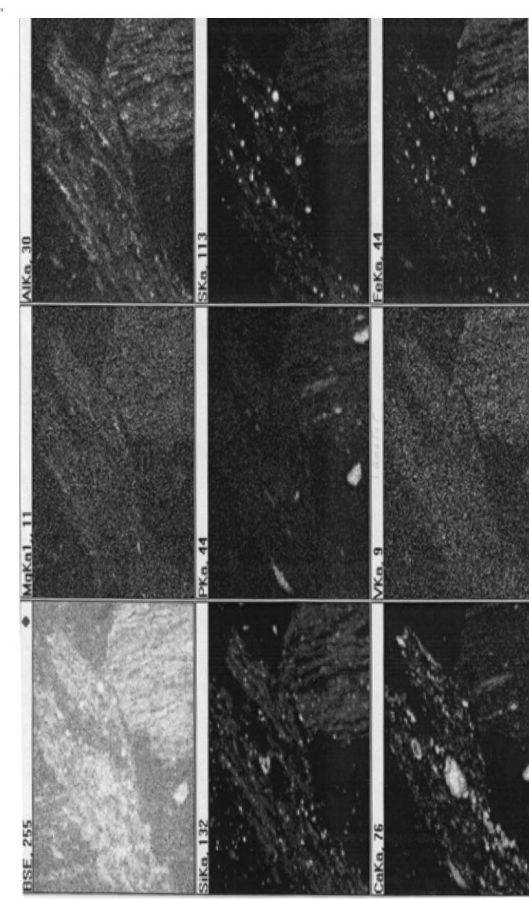
Примечание. +++ очень много; ++ много; + редкие.

Гидроокислы железа (гетит и гидрогетит) – широко распространенные минералы горючих сланцев палеогена. Формирование этих минералов происходило осаждением железа, поступающего в морской бассейн, в результате коагуля-

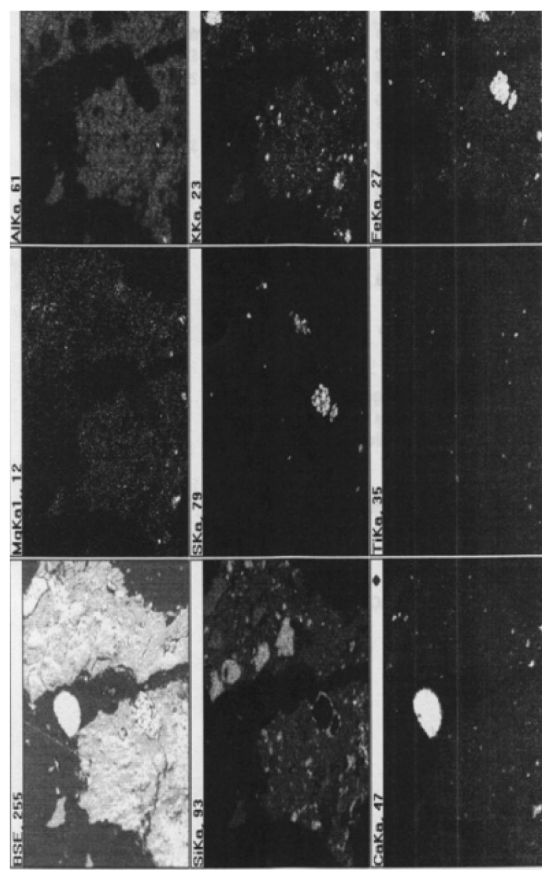
ции коллоидальных частиц водной окиси: из гелей водной окиси железа возникают гидрогетит и гетит. Возможно, часть гидроокислов железа, выделяющихся в морском бассейне, имеет биогенное происхождение.



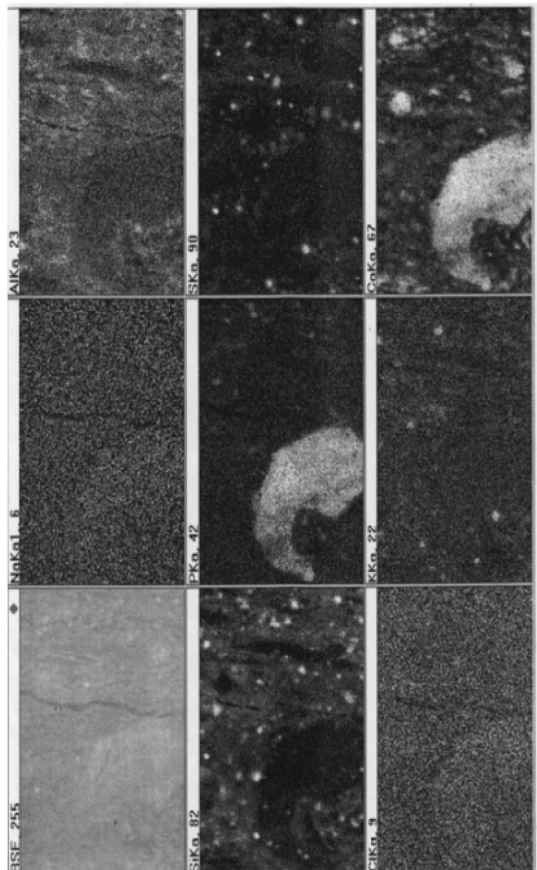
a



B



6



I

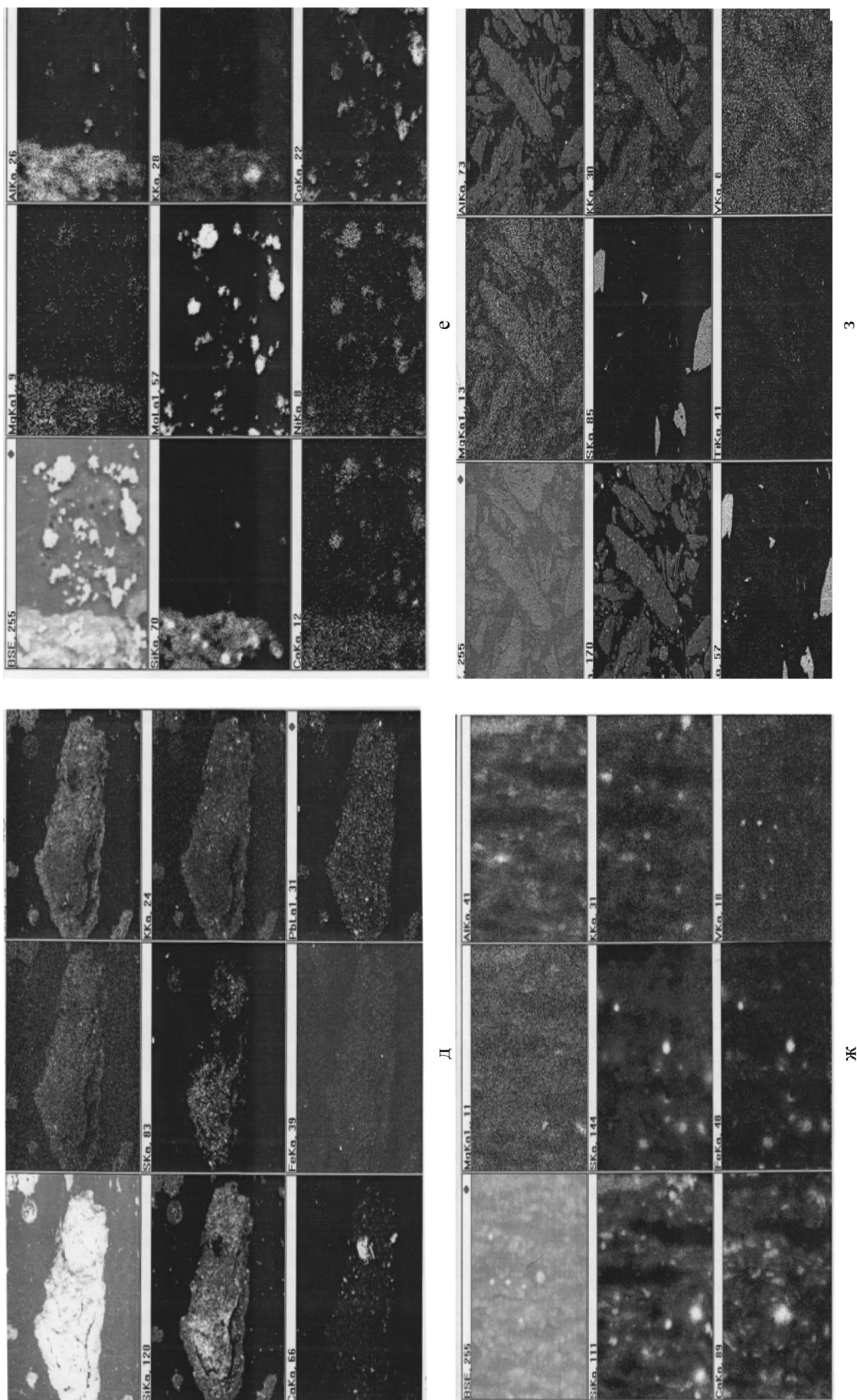


Рис. 1. Растровые картины распределения элементов: а – в титансодержащем монтмориллоните; б – распределения Mg, Al, Si, S, K, Pb в смеси Pb-монтмориллонит-гидролюда; в – монтмориллонит с микровключениями; г – распределения Mg, Al, Si, K, Ca, Mo, Ni, Co в смеси монтмориллонита – органического; д – смесь органического вещества (черное поле) и глинистых минералов (монтмориллонит); е – в смеси V-монтмориллонит-гидролюда-органическое вещество; ж – в смеси монтмориллонита и органического вещества; з – в V содержащей гидролюде в ассоциации с гипсом

Гетит и гидрогетит присутствуют в виде микроструктурных образований, содержат адсорбированную или капиллярную воду, в результате чего зафиксировано избыточное против теоретической формулы содержание воды. Данные минеральные образования содержат большой комплекс элементов-примесей: Al (до 8,1 %) частично входит в решетку гидрогетита и является алюмогидрогетитом; K (от 0,2 до 0,9 %), Ca (от 0,1 до 1,8 %), V (0,05–1,3 %), Te (0,1–0,9 %), SO_3 (0,1–1,5 %), Sb (0,2–1,6 %), Co (0,2–0,4 %), Ni (0,1–1,3 %), Cu (0,1–2,5 %), Zn (0,03–0,6 %), Se (0,1–0,2 %), U (0,1–0,3 %), Th (0,1 %), Yb (0,8 %), Y (1,2 %), Si (0,3–21,5 %), As (0,1–0,3 %), Pt (0,1–0,3 %), Au (0,1–0,4 %), Ag (0,01–0,1 %), Ti (0,1–0,2 %).

Гидрогетиты с содержанием Sb (1,6 %), Ni (0,3 %), V (1,3 %), Cu (2,5 %) можно считать никель-, ванадий-, медь- и сурьмасодержащими разновидностями. Кроме этого, смесью гидроокислов железа с кремнеземом (опалом) установлен авозит – разновидность гидрогетита.

Органогенный апатит, обладая специфической структурой, благоприятен для адсорбции и захвата различных элементов. Так, в органогенных апатитах горючих сланцев установлены высокие содержания: Cl (от 0,09 до 1,5 %), V (от 0,1 до 0,4 %), Y (от 0,1 до 1,2 %), Yb (до 0,9 %), La (от 0,1 до 1,3 %), Ce (от 0,2 до 1,2 %), U (от 0,1 до 0,5 %), Th (от 0,1 до 0,4 %). Кроме апатита присутствуют рентгеноаморфные фосфаты и сульфопосфаты: колофонит, ардилит и диадохит изоструктурны с гипсом и могут образовывать смешанные кристаллы. В этих минералах присутствуют редкоземельные элементы, уран, торий.

Карбонаты в горючих сланцах представлены кальцитом, доломитом, а также розазитом и малахитом. Образование органогенного низкомагнезиального, стронцийсодержащего кальцита происходило в связи с тем, что он характеризуется меньшей растворимостью относительно высокомагнезиального кальцита, являясь более устойчивой формой. Отсутствие арагонита в горючих сланцах объясняется его меньшей устойчивостью относительно кальцита. Отсутствие значительных количеств магния в кальцитах объясняется предпочтительным замещением кальция ионом с большим радиусом (Sr^{2+}). Содержание магния в кальцитах составляет (0,5–0,7 %), стронция (0,5–1,2 %). Кальцит концентрирует и редкоземельные элементы: Y (0,3 %), Yb (от 0,8 до 1,3 %), La (0,1 %), U (от 0,1 до 0,4 %), Th (0,1 %), V (0,4 %).

В аутигенном доломите, который образовался по кальциту, присутствуют высокие концентрации Yb (0,03–0,8 %), La (0,4–0,5 %), Ce (0,2–0,4 %). Цеолиты в горючих сланцах представлены кальциевым домонтитом.

В горючих сланцах установлен необычный минерал аламосит – силикат свинца и кремнезема. Впервые этот минерал был установлен в зоне окисления свинцово-цинковых месторождений Аламоса (Мексика) и Цумб (Намибия). Химический и микронзондовый состав аламосита данных месторождений (%): 1) PbO – 78,13; FeO – 0,09; SiO_2 – 21,1; прочие = 0,53; 2) среднее из четырех микронзондовых анализов: PbO = 79,4; CaO = 0,1; FeO – 0,1; Al_2O_3 – 0,1; SiO_2 – 20. Минерал присутствует в виде каплевидных образований размером (0,5–5 мкм) в тонкодисперсной органо-глинистой матрице. Часть аламосита представляет смесь аламосита и опала.

В горючих сланцах довольно часто встречается сульфатные минералы, гипс и, реже, барит, целестин, ангидрит, мелантерит, которые содержат редкоземельные элементы и стронций.

Выводы о связи органического вещества с металлами базируются в основном на данных экспериментальных исследований и анализе валового содержания металлов в организмах, водах и в пробах различных органических минеральных образований и очень редко в абиогенных минералах, составляющих основу этих пород.

Не отрицая геохимическую форму связи органического вещества с металлами, наши исследования доказали существование абиогенных геохимических форм связей металлов в горючих сланцах. На основании этого можно сделать вывод, что наиболее вероятной является биогенно-абиогенная модель концентрирования металлов в горючих сланцах.

Горючие сланцы палеогена Республики Узбекистана перспективны не только как углеродосодержащее сырье, но и как новый нетрадиционный тип комплексных биогенно-абиогенных благородно-редкометаллических руд. По видимому, их надо рассматривать как рудные месторождения – аналоги медно-полиметаллическим месторождениям Польши в пермских черных сланцах [4].

Особо следует обратить внимание на присутствие золота и платиноидов в данном типе месторождений, которые приурочены к сульфидам (г/т): Au (от 1000 до 5000); Ag (от 200 до 2000); Pt (от 300 до 5000); Pd (от 1000 до 6000); в гидроокислах железа (гетит, гидрогетит): Au (от 2000 до 4000); Ag

(до 200), Pt (от 2000 до 3000), Pd (от 700 до 1000). Высокие содержания золота (5–360 г/т), серебра (10–1000 г/т) и Pt (10–120 г/т) установлены в перм-

ских черных сланцах медно-полиметаллического месторождения Люблина (Польша) по данным Н. Kucha [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Аррениус Г. Осадконакопление на океаническом дне // Изд. «ИЛ», М, 1967. С. 13–40.
2. Прохоренко Г. А., Лузановский А. Г. Металлоносные горючие сланцы Республики Узбекистан // Изд. «Фан», Т. 1990. 154 с.
3. Туресебеков А. Х., Василевский Б. Б., Шарипов Х. Т. Минералого-геохимические свойства горю-

чих сланцев палеогена Узбекистана как руд благородных и редких металлов // Геология и минеральные ресурсы. 2007, № 5. С. 95–97.

4. Kucha H. Feldspar, clay, organic and carbonate receptors of heavy metals in Zechsten deposit (Kypferschiefer – tune). Poland. Trans Inst. Mining Met. 1985, V 94. P. 133–146.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАЛКОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В СХЕМАХ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ РУДЫ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

Аккерман Ю. Э.

ЗАО «Механобр инжиниринг», г. Санкт-Петербург

Идея использования высокого давления при дроблении горных пород в валковых дробилках принадлежит немецкому профессору К Шённерту [1]. Образование силы сжатия между валками осуществляется с помощью замкнутого масляного устройства. Давление на валки передается через поршни гидравлической системы. Роль пружин, обеспечивающих поддержание заданной величины зазора между валками при прохождении материала через дробилку, играют заполненные азотом аккумуляторы. Валки приводятся в действие от отдельных двигателей через редукторы. Диаметры валков промышленных размеров изменяются от 1,0 до 2,5 м. Давление в системе находится в диапазоне от 50 до 280 МПа, мощность двигателей приводов – от 2×150 до 2×2500 кВт, производительность по руде – от 50 до 3000 т/ч. Расход электроэнергии составляет от 1,0 до $3,0 \frac{\text{кВт}}{\text{т}}$.

Первые валки высокого давления применялись для дробления малоабразивных материалов. В цементной промышленности – для дробления клинкера, известняка, в алмазной промышленности – для дробления кимберлитов. После того, как срок службы рабочих элементов валков стал превышать 5000 часов, за счёт покрытия рабочих поверхностей бандажей шипами из карбида вольфрама, их стали применять на железорудных предприятиях и обогатительных фабриках цвет-

ной металлургии при дроблении прочных и абразивных пород.

В процессе эксплуатации валков высокого давления оказалось, что дробление в слое с использованием высокого давления обеспечивает высокую степень сокращения крупности с получением дроблёного продукта со значительными дефектами внутренней структуры. Такой материал требует меньше затрат энергии при последующем измельчении в шаровых мельницах.

По предложению фирмы Thyssen Krupp Polysius и ОАО «Кольская ГМК» были проведены сравнительные испытания дробимости и измельчаемости особо прочной сульфидной медно-никелевой руды с использованием лабораторной валковой дробилки высокого давления LABWAL 250 × 100 мм, являющейся копией промышленных дробилок больших размеров.

Обогатительная фабрика ОАО «Кольская ГМК» перерабатывает 8,0 млн. т в год сульфидной медно-никелевой руды. Дробление осуществляется в конусных дробилках среднего и мелкого дробления КСД-2200 и КМДТ-2200 в открытом цикле до конечной крупности 80 % класса – 16 мм. Дроблёная руда измельчается в 2 стадии в шаровых мельницах МШР 3600 × 5000, МШЦ 3600 × 5500 и МШЦ 6500 × 9650 до конечной крупности 85 % класса – 0,074 мм (80 % класса – 70 мкм).

По результатам проведённых исследований требовалось определить условия, при которых обогатительная фабрика могла бы с использованием валков высокого давления повысить производительность примерно на 20 % до 9,5 млн. т в год на действующем измельчительном оборудовании без реконструкции главного корпуса.

Исследования проводились на пробе руды текущей добычи. По данным изучения вещественного состава пробы руды содержали Ni = 0,42 %, Cu = 0,21 %, Fe_{общ.} = 13,2 %, Si в пересчёте на SiO₂ – 37,1 %. Руда относится к типу бедных, тонковкрапленных, труднообогатимых сульфидных медно-никелевых руд с повышенным содержанием магнетита. Проба представлена тремя разно-

видностями вмещающих пород: серпентинитом, серпентизированным перидотитом, перидотитом, относящихся к самой высокой категории крепости пород по шкале профессора М. М. Протоdjeконова. В качестве критериев дробимости и измельчаемости были приняты индексы чистой работы дробления $W_{i_{др.}}$ и измельчения $W_{i_{изм.}}$ по Ф. Бонду. Дробимость исследовалась в валковой дробилке 200 × 125 мм обычной конструкции и валковой дробилке высокого давления LABWAL 250 × 10 мм на материале крупностью –12+0 мм. В табл. 1 приведены показатели дробления валковых дробилок обычной конструкции и LABWAL в замкнутом цикле с грохотом при получении готового продукта дробления крупностью –5+0 мм.

Таблица 1

Показатели дробления валковых дробилок обычной конструкции и LABWAL в замкнутом цикле с грохотом

Крупность классов, мм Показатели	Исходное питание		Подрешётные продукты валковых дробилок			
			Обычной конструкции		LABWAL	
	%	Σ %	%	Σ %	%	Σ %
10,0	1,9	98,1				
4,0	52,2	45,8	4,7	95,3	10,3	89,7
1,0	22,5	23,3	60,1	35,2	52,9	47,1
0,5	5,5	17,8	11,1	24,1	11,8	35,3
0,074	10,3	7,5	14,6	9,5	24,4	10,9
0,040	0,9	6,6	2,0	7,5	1,6	9,3
–0,040	6,6		7,5		9,3	
Итого:	100,0		100,0		100,0	
Ширина выходной щели, b, мм			2–3		6	
F80, мкм	7000					
P80, мкм	–		3070		3130	
Циркулирующая нагрузка, %			8,0		19,0	
Удельный расход полезной энергии, E, $\frac{\text{кВт}}{\text{т}}$			1,8		3,3	
Индекс чистой работы дробления W_i , $\frac{\text{кВт}}{\text{т мкм}^{0,5}}$			29,8		56,3	

Из представленных данных видно, что удельные затраты полезной энергии в валковой дробилке высокого давления получились выше, чем в дробилке обычной конструкции и составили 3,3 $\frac{\text{кВт}}{\text{т}}$ против 1,8 $\frac{\text{кВт}}{\text{т}}$. При этом содержание мелких классов менее 1,0 мм также получилось больше – 47,1 % против 35,2 %, а класса – 40 мкм – 9,3 % против 7,5 %. Соответственно индексы чистой работы дробления по Ф. Бонду получились

равными 56,3 и 29,8 $\frac{\text{кВт}}{\text{т мкм}^{0,5}}$. Индексы чистой работы дробления определялись по формуле:

$$W_i = \frac{E \times \sqrt{F_{80}}}{10 \times \left(\sqrt{\frac{F_{80}}{P_{80}}} - 1 \right)} \frac{\text{кВт}}{\text{т мкм}^{0,5}},$$

где E — затраты полезной энергии на дробление 1 т исходного питания, $\frac{\text{кВт}}{\text{т}}$;

F_{80} , P_{80} — размеры квадратных отверстий сит, через которые проходит 80 % исходного питания и готового продукта, мкм.

Исследование измельчаемости продуктов дробления валковых дробилок обычной конструкции и LABWAL проводились в лабораторной шаровой мельнице 300 × 200 мм по методике институ-

та «Механообр» в водной среде в периодически замкнутом цикле с постоянной циркулирующей нагрузкой 200 % на материале крупностью –5+0 мм. В таблице 2 приведены показатели измельчения в шаровой мельнице 300 × 200 мм до крупности –0,1 мм готовых продуктов валковых дробилок обычной конструкции и LABWAL.

Таблица 2

Показатели измельчения в шаровой мельнице 300 × 200 мм до крупности –0,1 мм готовых продуктов валковых дробилок обычной конструкции и LABWAL

Крупность классов, мм Показатели	Готовый продукт валковой дробилки		Готовый продукт LABWAL	
	%	Σ %	%	Σ %
0,10	–	100,0	–	100,0
0,074	30,5	69,5	29,1	70,9
0,056	14,0	55,5	16,9	54,0
0,040	12,5	43,0	12,0	42,0
–0,040	43,0		42,0	
Итого	100,0		100,0	
F80, мкм	3070		3130	
P80, мкм	82		85	
Удельный расход полезной энергии $E, \frac{\text{КВТ}}{\text{Т}}$	27,6		25,1	
Индекс чистой работы измельчения $W_i, \frac{\text{КВТ}}{\text{Т}} \text{ мкм}^{0,5}$	29,9		27,7	

Из представленных данных видно, что затраты полезной энергии при измельчении готового продукта дробилки LABWAL получились ниже, чем для валковой дробилки обычной конструкции – $25,1 \frac{\text{КВТ}}{\text{Т}}$ против $27,6 \frac{\text{КВТ}}{\text{Т}}$. Соответственно индексы чистой работы измельчения получились $27,7 \frac{\text{КВТ}}{\text{Т}} \text{ мкм}^{0,5}$ против $29,9 \frac{\text{КВТ}}{\text{Т}} \text{ мкм}^{0,5}$. Это позволило оценить целесообразность использования валковых дробилок высокого давления для повышения производительности шаровых мельниц обогатительной фабрики ОАО «Кольская ГМК».

Для увеличения переработки руды на обогатительной фабрике от 8,0 до 9,5 млн. тонн руды в год при достигнутой конечной крупности из-

мельчения 85 % класса –0,074 мм без установки дополнительного измельчительного оборудования удельный расход полезной энергии за счёт снижения крупности дроблёной руды от использования валковых дробилок высокого давления должен составлять $8,0 : 9,5 = 0,84$ от достигнутой величины.

В настоящее время при крупности исходного питания шаровых мельниц 80 % класса – 16000 мкм получается готовый продукт измельчения крупностью 85 % класса – 0,074 мм (80 % класса – 70 мкм). При этом расчётная величина удельного расхода полезной энергии получается равной:

$$E = \frac{10 \times W_i \times \left(\sqrt{\frac{F_{80}}{P_{80}}} - 1 \right)}{\sqrt{F_{80}}} = \frac{10 \times 29,9 \times \left(\sqrt{\frac{16000}{70}} - 1 \right)}{\sqrt{16000}} = 33,4 \text{ кВтч/т},$$

где W_i – индекс чистой работы измельчения по Ф. Бонду, по данным лабораторных исследований измельчаемости равен $29,9 \frac{\text{КВТ}}{\text{Т}} \text{ мкм}^{0,5}$;

F_{80} – размер квадратного отверстия сита, через которое проходит 80 % исходного питания мельниц, мкм;

P_{80} – размер квадратного отверстия сита, через которое проходит 80 % готового продукта измельчения, мкм.

Ожидаемая величина удельного расхода полезной энергии за счёт снижения крупности пи-

$$F_{80} = \left(\frac{W_i}{\frac{W_i}{\sqrt{P_{80}}} - 10} \right)^2 = \left(\frac{27,7}{\frac{27,7}{\sqrt{70}} - 10} \right)^2 = 3070 \text{ мкм}$$

где 27,7 – индекс чистой работы измельчения в шаровых мельницах продуктов дробления валковых дробилок высокого давления, $\frac{\text{кВт}}{\text{т}}$ мкм^{0,5}.

Наиболее простым в практической реализации в условиях обогатительной фабрики ОАО «Кольская ГМК» вариантом возможного использования валковых дробилок высокого давления является организация четвёртой стадии дробления.

$$E = \frac{10 \times W_{\text{ив}} \times \left(\sqrt{\frac{F_{80}}{P_{80}}} - 1 \right)}{\sqrt{F_{80}}} = \frac{10 \times 56,3 \times \left(\sqrt{\frac{30000}{3070}} - 1 \right)}{\sqrt{30000}} = 6,92 \text{ кВтч/т}$$

где $W_{\text{ив}}$ – индекс чистой работы дробления в валковых дробилках высокого давления, $\frac{\text{кВт}}{\text{т}}$ мкм^{0,5};

F_{80} – размер квадратных отверстий сита, через которое проходит 80 % питания валковой дробилки высокого давления, мкм;

P_{80} – размер квадратного отверстия сита, через которое проходит 80 % готового (подрешётного) продукта валковой дробилки высокого давления, мкм.

Материал в главный корпус будет поступать в виде пульпы, и поэтому валковые дробилки высокого давления должны работать в синхронном режиме с шаровыми мельницами. При годовой переработке 9,5 млн. т и 8000 часов чистого времени работы их производительность по исходному питанию составит $(9,5 \times 10^6) : 8000 = 1188 \text{ т/ч}$, а затрачиваемая при этом полезная мощность – $1188 \times 5,7 = 6772 \text{ кВт}$. При коэффициенте использования установленной мощности двигателей валковых дробилок высокого давления, равном 0,65, потребная установочная мощность будет равна $6772 : 0,65 = 10403 \text{ кВт}$.

В зависимости от условий эксплуатации, со-пряжения валковых дробилок высокого давле-

тания шаровых мельниц от использования валковых дробилок высокого давления получается равной $33,4 \times 0,84 = 28,1 \frac{\text{кВт}}{\text{т}}$. При этом крупность питания шаровых мельниц составит 80 % класса –3070 мкм:

В этом случае готовый продукт дробилок мелко-го дробления третьей стадии крупностью 80 % класса –16 мм будет додрабливаться до расчётной крупности –5+0 мм (80 % класса –3070 мкм) в валковых дробилках высокого давления в замкнутом цикле с грохотами мокрого грохочения. При этом расчётная величина удельных затрат полезной энергии на додрабливание составит:

ния и шаровых мельниц расчётная установочная мощность двигателей дробилок может быть реализована в различных вариантах. Например, к установке могут быть приняты 2 дробилки ВВД 24 × 17 с установочной мощностью двигателей 2 × 2500 кВт или 4 дробилки ВВД 22 × 10 с установочной мощностью привода 2 × 1250 кВт каждый и т. д.

Кроме этого варианта, продукт валковых дробилок высокого давления крупностью 80 % класса –3070 мкм может быть получен путём додрабливания готового продукта дробилок среднего дробления. В этом случае исключается третья стадия дробления с установочной мощностью дробилок 1800 кВт при установке дополнительной дробилки среднего дробления с установочной мощностью 500 кВт. Дробилки среднего дробления приводятся в режим работы в замкнутом цикле с грохотами при получении подрешётного продукта крупностью –40+0 мм (80 % класса –30 мм), чтобы обеспечить подачу калиброванного питания в дробилки высокого давления. При этом расчётная величина удельных затрат полезной энергии на додрабливание составит:

$$P_{80} = \left(\frac{W_i}{\frac{W_i}{\sqrt{F_{80}}} + 10} \right)^2 = \left(\frac{27,7}{\frac{27,7}{\sqrt{8000}} + 10} \right)^2 = 79 \text{ мкм}$$

Полезная мощность получается равной $1188 \times 6,92 = 8221$ кВт, установочная – $8221 : 0,65 = 12648$ кВт. Для этого варианта к установке подойдут 3 дробилки ВВД $24,5 \times 14$ с установочной мощностью привода 2×2200 кВт каждая: $n = 12648 : 4400 = 2,87$ шт.

По третьему варианту дробилки высокого давления могут найти применение при работе в открытом цикле для додраблывания продукта дробилок мелкого дробления крупностью 80 % – 16 мм.

Как показали опыты по исследованию дробимости медно-никелевой руды в лабораторной валковой дробилке высокого давления LABWAL, при работе в оптимальном режиме степень сокращения крупно-

сти $i_{80} = F_{80} : P_{80}$ может быть принята равной 2. При этом готовым продуктом дробления будет средняя часть разгрузки дробилки, а боковые части, как более крупные, будут возвращаться на додраблывание.

При измельчении материала крупностью 80 % класса – 8 мм в шаровых мельницах расчётная конечная крупность измельчения составит:

$$P_{80} = \left(\frac{W_i}{\frac{W_i}{\sqrt{F_{80}}} + E} \right)^2 = \left(\frac{27,7}{\frac{27,7}{\sqrt{8000}} + 10} \right)^2 = 79 \text{ мкм}$$

Расчётная величина удельных затрат полезной энергии на додраблывание получается равной:

$$E = \frac{10 \times W_{\text{IV}} \times \left(\sqrt{\frac{F_{80}}{P_{80}}} - 1 \right)}{\sqrt{F_{80}}} = \frac{10 \times 56,3 \times \left(\sqrt{\frac{16000}{8000}} - 1 \right)}{\sqrt{16000}} = 1,84 \text{ кВтч/т}$$

При работе дробилок ВВД в режиме дробильного отделения их производительность составила: $Q = 9500000 : (365 \times 24 \times 0,8) = 1355$ т/ч. Затрачиваемая полезная мощность получится равной $1355 \times 1,84 = 2493$ кВт, установочная – $2493 : 0,65 = 3836$ кВт. Для этого варианта лучше подойдут 2 дро-

билки ВВД $20/10$ с установочной мощностью двигателей 2×950 каждый: $n = 3836 : 1900 = 2,02$ шт.

Для доизмельчения продукта крупностью 80 % класса – 79 мкм до 80 % класса – 70 мкм расчётная величина удельных затрат полезной энергии будет равняться:

$$E = \frac{10 \times 29,9 \times \left(\sqrt{\frac{79}{70}} - 1 \right)}{\sqrt{79}} = 2,085 \text{ кВтч/т}$$

Затрачиваемая полезная мощность – $1188 \times 2,085 = 2477$ кВт, а установочная – $2477 : 0,85 = 2914$ кВт, где 0,85 – коэффициент использования установочной мощности мельниц. Для этого случая подойдут три вертикальные шаровые мельницы VTM-1500 с установочной мощностью 1104 кВт каждая: $n = 2914 : 1104 = 2,64$ шт.

Таким образом, для реализации идеи повышения производительности фабрики от 8 до 9,5 млн. т в год при сохранении достигнутой конечной крупности измельчения 85 % класса – 0,074 мм (80 % класса – 70 мкм) по первому варианту потребуется дополнительно 6772 кВт полезной мощности, по второму – за вычетом $1800 \times 0,65 = 1170$ кВт за счёт исключения операции мелкого дробления и добавления одной дробилки $500 \times 0,65 = 325$ кВт в операцию среднего дробления потребуется $8221 - 1170 + 325 = 7376$ кВт.

По третьему варианту потребуется 2493 кВт на додраблывание в ВВД от 80 % класса – 16 мм до 80 % класса – 8 мм и 2477 кВт на доизмельчение в вертикальных мельницах от 80 % класса – 79 мкм до 80 % класса – 70 мкм, что в сумме составляет $2493 + 2477 = 4970$ кВт. Действующей фабрике без использования валковых дробилок высокого давления при увеличении производительности на

$$\frac{(9,5 - 8,0) \times 10^6}{8000} = 188 \text{ т/час}$$

потребуется дополнительно $188 \times 33,4 = 6279$ кВт полезной мощности за счёт увеличения суммарной величины рабочих объёмов шаровых мельниц.

В табл. 3 приведены расчётные затраты полезной энергии по трём вариантам возможного использования валковых дробилок высокого давления для повышения производительности шаровых мельниц.

Таблица 3

Расчётные затраты полезной энергии, $\frac{\text{кВт}}{\text{т}}$

Операция Показатели	Базовый вариант	Додрабливание продукта КМД крупностью 80 % клас- са –16 мм до –5+0 мм	Додрабливание продук- та КСД крупностью 80 % класса –30 мм до –5+0 мм	Додрабливание продук- та КМД крупностью 80 % класса –16 мм до 80 % класса –8 мм
Среднее дробление открытый цикл замкнутый цикл	0,60 –	0,60 –	– 1,0	0,60 –
Мелкое дробление	1,0	1,0	–	1,0
Дробление в валковых дробилках высокого дав- ления в замкнутом цикле до –5+0 мм	–	5,7	6,9	–
Дробление в валковых дробилках высокого дав- ления до 80 % –8 мм	–	–	–	1,8
Измельчение в шаровых мельницах	33,4	28,1	28,1	28,1
Измельчение в вертикаль- ных шаровых мельницах	–	–	–	2,1
Итого	35,0	35,4	36,0	33,6
Дополнительно установ- ливаемое оборудование	–	RP 24/17–2 2 × 2500кВт	RP 24,5/14–3 2 × 2200кВт	RP 20/10–2 2 × 950кВт VTM–1500–3 1100кВт
Суммарная дополнитель- ная мощность, кВт		10000	13200	7100

Сравнение полученных расчётных величин дополнительной полезной мощности по вариантам указывает на третий вариант с работой дробилок ВВД в открытом цикле и использования вертикальных шаровых мельниц как наиболее предпочтительный.

Полученные результаты лабораторных исследований и выполненные на их основе расчёты свидетельствуют о возможности использования валковых дробилок высокого давления для повышения производительности обогатительной фабрики ОАО «Кольская ГМК» до 9,5 млн. тонн руды в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klymowsky R., Patzelt N., Knecht J., Burchardt E., 2002, Selection and sizing of high pressure grinding rolls, Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control processing, Volume I: 636–668

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ

Вайсберг Л. А. ¹, Каменева Е. Е. ²

¹НПК ОАО «Механобр-техника», г. Санкт-Петербург

²ПетрГУ, г. Петрозаводск

Горные породы состоят из разнородных минеральных фаз и характеризуются наличием дефектов на различных масштабных уровнях – от трещин макроразмеров, микронарушений

(поры, микротрещины) до дефектов на уровне кристаллической решетки (точечные дефекты, краевые и винтовые дислокации). Характер распределения минеральных фаз и дефектов струк-

туры определяет прочность породы и ее поведение в процессе дезинтеграции [1–4].

С одной стороны, в процессе дробления в материале исчезают дефекты макроуровня. С другой стороны, при дезинтеграции во всем объеме разрушаемого материала создается деформационное поле, приводящее к развитию микронарушений и увеличению пористости, что отмечается многими исследователями. В работах [5–7] увеличение пористости связывается с появлением вторичных новообразованных пор и микротрещин. В зависимости от вида применённой нагрузки (растяжение, сжатие, изгиб) происходит накопление скрытых (нереализованных при дроблении) микротрещин и увеличение их в размерах [3]. При циклическом нагружении изменяется соотношение пор разного размера и происходит деформация минерального вещества [8].

Появление новообразованных дефектов в виде микротрещин в процессе стадийного дробления и измельчения является благоприятным фактором при подготовке руды к обогащению, когда необходимо максимально раскрыть минеральные агрегаты и получить измельчённый материал. При дроблении же горных пород необходимо получить зерна, имеющие размеры от 5–10 мм до 40–70 мм. В этом случае увеличение дефектности структуры приводит к снижению прочности получаемых зерен щебня.

Исследование процесса трансформации структуры горных пород в зернах щебня как в конечных продуктах дезинтеграции является необходимым условием при решении практических задач обоснования вида нагрузки при дроблении, выбора дробильного оборудования, оценки долговечности щебня в процессе его эксплуатации.

При этом важным моментом исследований является установление количественных характеристик и зависимостей, связывающих прочностные свойства пород и дефектность их структуры. Решение этих задач невозможно без привлечения современных аналитических и компьютерных методов.

В настоящей работе изучена структура зерен щебня с применением методов сканирующей электронной микроскопии (SEM) и компьютерной рентгеновской микротомографии (X-ray microCT).

Метод SEM позволяет исследовать поверхность пород на микроуровне с получением количественных характеристик – размеров пор, трещин, зерен минералов, а также получать дан-

ные по элементному составу отдельных участков сканируемой поверхности.

Рентгеновская томография (X-ray micro-CT) является неразрушающим методом изучения внутреннего строения твердых материалов, основанным на зависимости линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения от химического состава и плотности вещества. Компьютерная обработка теневых проекций, получаемых при просвечивании образцов рентгеновским лучом, позволяет визуализировать внутреннюю трехмерную структуру образца и выполнить детальный анализ морфометрических и плотностных характеристик как на отдельных сечениях, так и по всему объему образца с получением количественных значений параметров [8, 9].

Исследование поверхности горных пород методом SEM

Сканирующая электронная микроскопия выполнена на электронном микроскопе HITACHI SU1510 с рабочим напряжением 10 kV и фокусным расстоянием 12,9–21,1 мм. Изучена поверхность зерен щебня, полученного в результате дробления пород в лабораторной щековой дробилке ДЩ 60×100, обеспечивающей степень сокращения $s = 2,5$.

Просканирована поверхность около 1000 зерен щебня из гранита и габбродиабаз разных месторождений Республики Карелия. Размер исследуемых зерен – от 5 до 20 мм. Структура и текстура пород уточнялась в результате петрографического изучения шлифов. Для сканирования выбирались породы без микротрещин по данным микроскопических наблюдений.

Анализ полученных изображений поверхности зёрен щебня свидетельствует о наличии микротрещин как на контактах зерен, так и внутри зёрен.

Обобщение полученных результатов показывает, что наиболее крупные микротрещины размером 0,5–4,0 мм отмечаются на контактах зерен плагиоклаза, микроклина и кварца в структуре гранита. На рис. 1 приведены изображения типичных трещин, образованных на границах сростаний минералов. Видно, что трещины имеют различную конфигурацию, размеры, сообщаемость.

Сканирование поверхности микроклина, присутствующего в зернах гранитного щебня, показывает, что поверхность минерала пронизана сетью микротрещин размерами 20–100 мкм. Также отмечаются крупные первичные поры размером до 100 мкм (рис. 2).

На поверхности плагиоклаза и кварца в зернах гранитного щебня фиксируются первичные

поры разных размеров, а вторичные микротрещины практически отсутствуют (рис. 3).

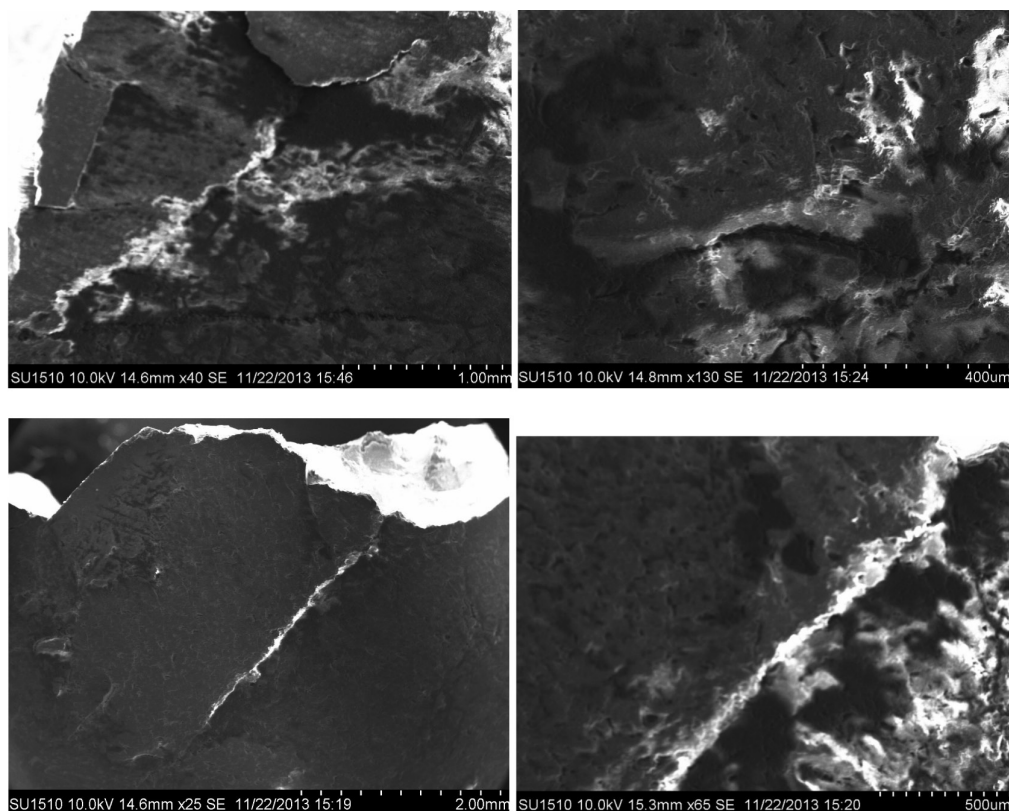


Рис. 1. Микротрещины на контактах зерен (гранит)

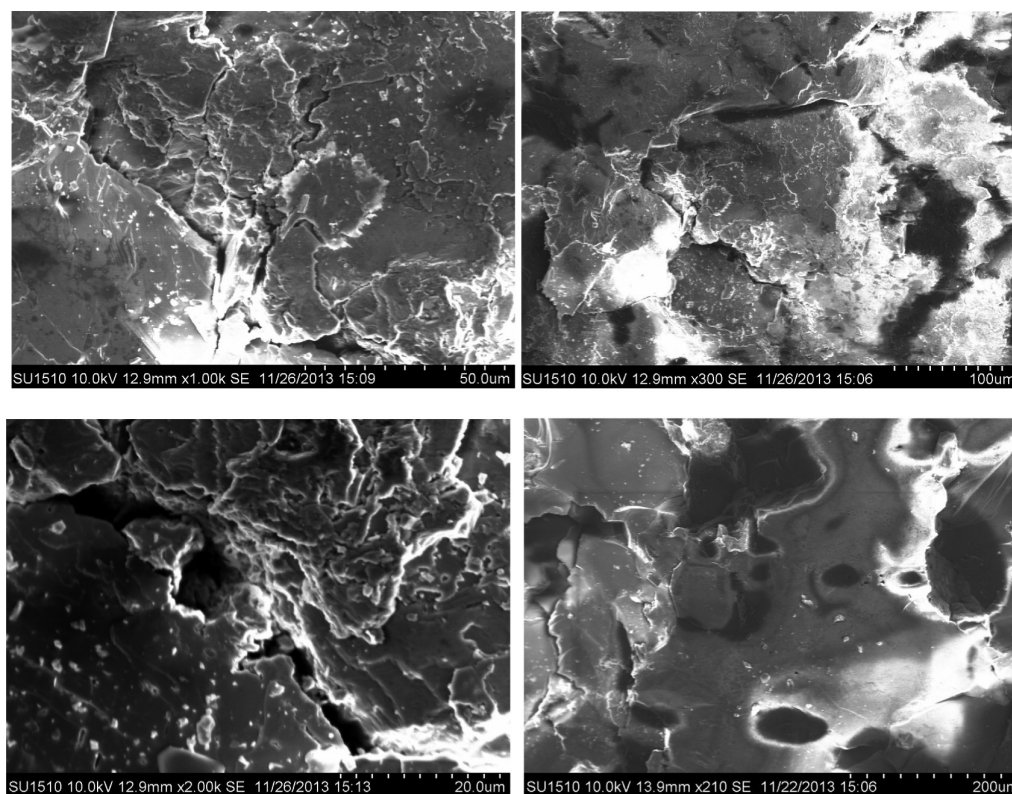
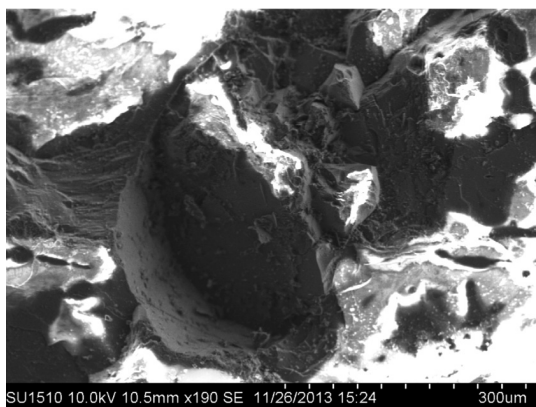
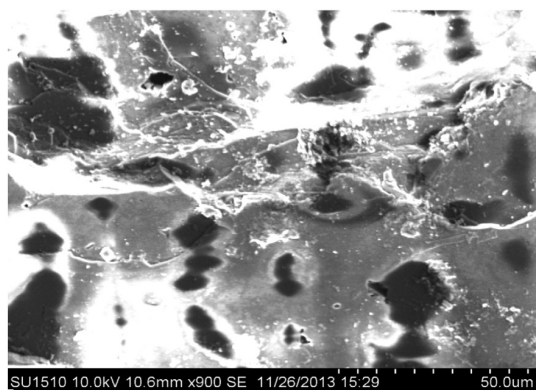


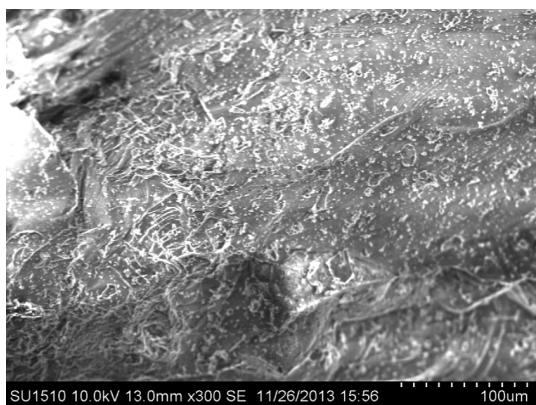
Рис. 2. Внутрикристаллические трещины на поверхности микроклина в зерне щебня из гранита



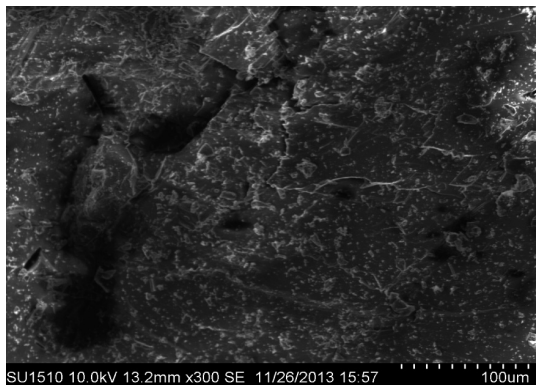
а



б



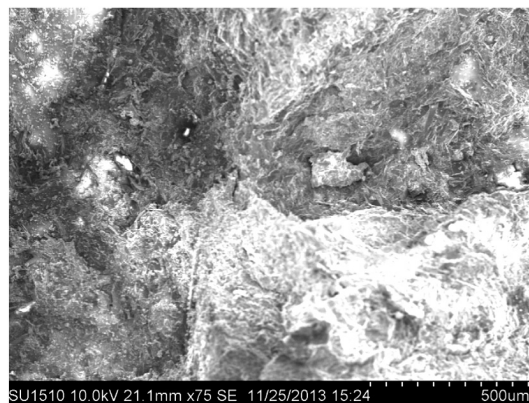
в



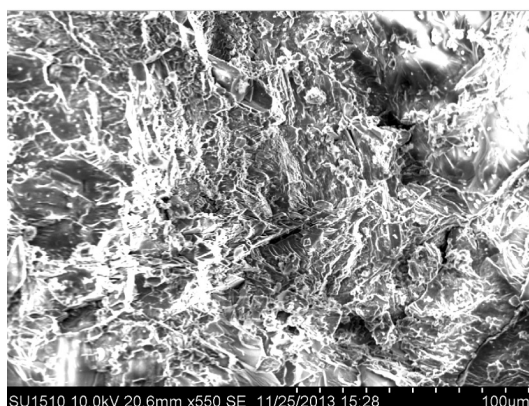
г

Рис. 3. Поры на поверхности плагиоклаза(а, б) и кварца (в,г) в зерне щелка из гранита

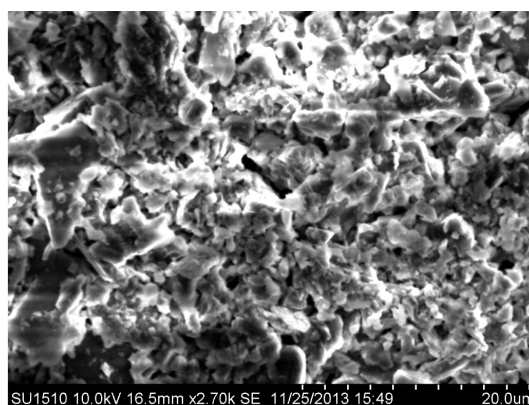
На поверхности зерен щелка габбро-диабазы отмечаются первичные поры капиллярного размера 20–40 мкм (рис. 4 а), субкапиллярного размера менее 1 мкм (рис. 4 в) и микротрещины длиной не более 10 мкм, расположенные на границах зерен (рис. 4 б).



а



б



в

Рис. 4. Поверхность зерна щелка из габбро-диабазы

Появление вторичных микротрещин в структуре пород при их дезинтеграции является причиной увеличения пористости и, как следствие – снижения прочности. В то же время, при изучении взаимосвязи дефектности структуры пород

и их физико-механических свойств породы необходимо иметь количественную характеристику порового пространства – размеры, форму пор, их сообщаемость и пространственную ориентацию [9–16].

Исследование структуры порового пространства методом X-ray мiкро-CT

Метод X-ray мiкро-CT позволяет выполнить количественную оценку параметров структуры порового пространства породы и получить дифференциальную характеристику пористости.

Исследования проводились с помощью прибора «SkyScan-1172» (Бельгия) с разрешениями от 0,5 до 27 мкм, оснащенного сертифицированными программами Skyscan1172 μ CT, NRecon, DataViewer, CTVox, CTAn, CTVol, SkyScan_MTS, Gidropora, совместимыми с 32 и 64-битными ОС Windows.

На примере гнейсо-гранита исследован характер изменения структуры порового пространства в результате дезинтеграции. Для томографии были отобраны два образца: pgu_01 – исходная порода, pgu_02 – аналогичный по составу и размерам образец, взятый из разгрузки дробилки.

Структура образцов, согласно петрографическому описанию шлифов, – среднезернистая гранолепидобластовая, текстура – массивная. В обоих образцах видимые дефекты отсутствовали. Образцы имели одинаковые значения минеральной плотности – 2,761 г/см³ и 2,767 г/см³, но различались по водопоглощению – 0,14 % и 1,9 % и пористости – 0,69 % и 2,48 %.

Результаты рентгенотомографии подтверждают изменение структуры порового пространства при дезинтеграции породы (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика образцов в системе 3D

Параметр	Характеристика порового пространства	
	Образец pgu_01	Образец pgu_02
Исследуемый объем, мм ³	3202,01	2342,81
Плотность пор, мм ⁻³	13	5
Объем пор, мм ³	22,11	58,16
Доля пор в объеме образца, %	0,69	2,48
Площадь поверхности пор, мм ²	2547,45	4122,35
Удельная поверхность пор, мм ⁻¹	115,21	70,87
Удельная поверхность пор на объем образца, мм ⁻¹	0,80	1,76
Сообщаемость пор, %	11,1	15,0

Абсолютное количество пор в образце pgu_01 – 41483 шт., в образце pgu_02. – 11667 шт.). Плотность пор (количество пор на единицу объема) составляет 13 мм⁻³ и 5 мм⁻³ соответственно. Удельная поверхность пор в обр. pgu_01 составляет 115,21 мм⁻¹, а в обр. pgu_02 – 70,87 мм⁻¹, в то же время удельная поверхность пор, пересчитанная на весь исследованный объем в обр. pgu_02 значительно выше, соответственно: 0,80 мм⁻¹ и 1,76 мм⁻¹, что свидетельствует о слиянии мелких пор в более крупные.

При объединении мелких пор теоретически должна увеличиться их сообщаемость, в то же время в исследованных образцах эта величина имеет близкие значения – 11 % в первом и 15 % во втором. Это объясняется тем, что в зависимости от конфигурации некоторые сообщающиеся между собой поры при томографии идентифицируются как единая пора. Увеличение сообщаемости и размера пор является причиной более высокого значения водопоглощения в образце pgu_02.

В результате дезинтеграции общая пористость увеличилась от 0,69 % (обр. pgu_01) до 2,48 % (обр. pgu_02) за счет появления новообразованных пустот и микротрещин. Если наибольший вклад в общую пористость (емкость) исходного образца вносят поры капиллярного размера диаметром 60–100 мкм, то в ёмкости образца pgu_02 возрастает значение более крупных пор (рис. 5).

Установлено, что минеральное вещество при дезинтеграции деформировалось. Характер деформации отдельных минеральных масс зависит от особенностей их распределения в структуре породы. Так, в результате петрографического изучения шлифов установлено, что биотит образует тонкие лейсты размерами от 0,1 до 1,5 мм. В результате действия сжимающих напряжений при дроблении происходит уплотнение минерального вещества за счет сближения зерен, что подтверждается данными томографии: при равных значениях суммарных объемов биотита в обоих исследованных образцах величина удельной поверхности в исходном выше, чем в образце, подвергшемся дроблению. Связанность лейст также увеличилась (табл. 2).

Полученные результаты свидетельствуют об изменении структуры горных пород при их дезинтеграции. Общая пористость увеличивается за счет появления новообразованных полостей и микротрещин, а также объединения последними мелких пор в более крупные.

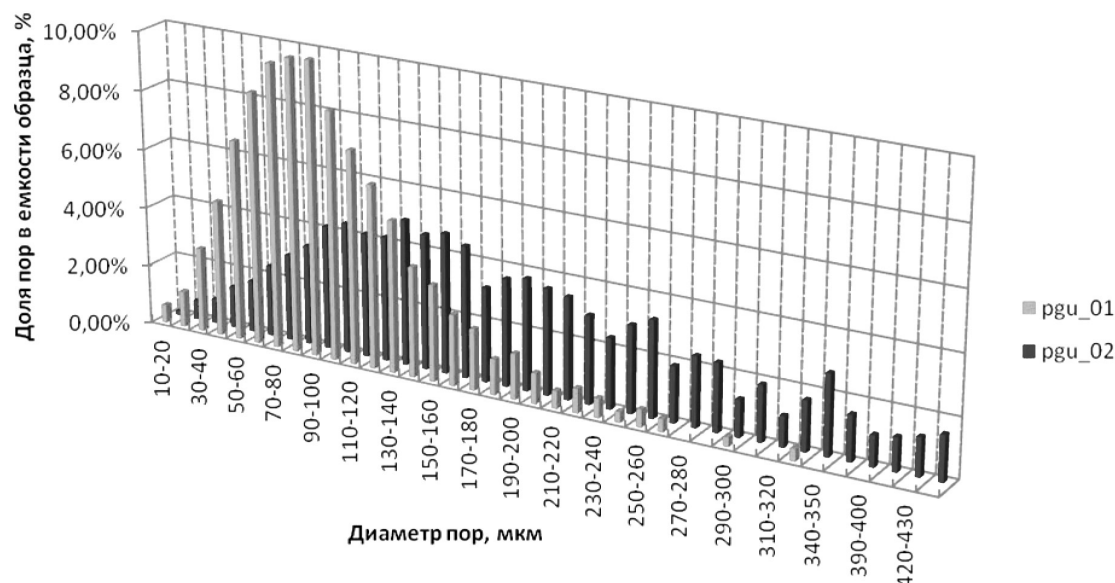


Рис. 5. Распределение пор различного размера по емкости

Таблица 2

**Характеристика биотита в образцах
гнейсо-гранита (в системе 3D)**

Параметр	Образец pgu_01	Образец pgu_02
Объем, мм ³	142,64	142,39
Доля в объеме образца, %	4,45	6,08
Площадь поверхности, мм ²	8749,11	3518,65
Удельная поверхность, мм ⁻¹	61,34	24,71
Удельная поверхность на объ- ем образца, мм ⁻¹	2,73	1,50
Связанность, %	29,6	39,2

В то же время, изменение структуры порового пространства пород определяется, с одной стороны, применяемым способом дробления, а с другой – исходными свойствами породы – пористостью, минеральным составом, текстурно-структурными особенностями, и требует в каждом конкретном случае индивидуального подхода. Таким образом, подход к проблеме совершенствования процесса дезинтеграции горных пород должен быть основан на детальном исследовании дефектности микроструктуры горных пород во взаимосвязи с их физико-механическими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ревнивцев В. И., Гапонов Г. В., Зарогатский Л. П. и др. Селективное разрушение минералов. М., Наука, 1988. 286 с.
2. Вайсберг Л. А., Зарогатский Л. П., Туркин В. Я. Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения. СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2004. 306 с.
3. Хопунов Э. А. Роль структуры и прочностных характеристик минералов в разрушении и раскрытии руд // Обогащение руд, 2011, № 2. С. 25–31.
4. Баранов Е. Г., Крымский В. И. Современное состояние и пути развития теории разрушения горных пород // Изв. ВУЗов. Горн. Журн., 1989, № 2. С. 1–10.
5. Буртан С. Т., Мустафин С. К. Состав и свойства минерального остова в связи с проблемой управления качеством асфальтобетона // Дорожная держава, 2010, № 10. С. 20–27.
6. Мясникова О. В., Шеков В. А. Некоторые аспекты оценки разрушения горных пород // Строительные материалы. 2008. № 7. С. 26–27.
7. C. L. Lin, J. D. Miller, C. H. Hsieh. Particle damage during HPGR breakage as described by specific surface area distribution of cracks in the crushed products // International Mineral Processing Congress, New Delhi, India, 2012, paper N. 687. P. 3397–3410.
8. Калиниченко И. В. Экспериментальное моделирование изменения деформационных и емкостных свойств пористых коллекторов в связи с эксплуатацией подземных хранилищ газа. Автореферат дисс. ... канд. геол.-мин. наук, М., 2009. 18 с.
9. Жилин П. А., Кривцов А. М. Микроструктурные модели в макроскопической механике сплошной среды // Тезисы докл. Всероссийской научн. -техн. конференции «Инновационные наукоемкие технологии для России», СПб, 26–27 апреля 1995 г. СПб, 1995. С. 161.

10. Григорьев М. В., Кульков С. Н. Исследование механических свойств корундовой керамики при изменении пористости и размеров кристаллитов // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, № 4, 2011. С. 113–120.

11. Ашмарин Г. Д., Салахов А. М., Болтакова Н. В., Морозов В. П. Влияние порового пространства на прочностные свойства керамики // *Стекло и керамика*, № 8, 2012. С. 23–25.

12. Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Кожевников Д. А. Петрофизика. М., Недра, 1991. 368 с.

13. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород. Л., Недра, 1985. 240 с.

14. Протасов Ю. И. Разрушение горных пород. – 3-е изд., М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. 453 с.

15. Ржевский В. В., Новик В. Я. Основы физики горных пород. Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Недра, 1978. 390 с.

16. Журков С. Н. К вопросу о физической природе прочности // *Физика твердого тела*, т. 22, вып. 11, 1980. С. 13–15.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РОЛЛЕР-ПРЕССЕ

Краснов Г. Д., Чихладзе В. В.

ИПКОН РАН, г. Москва, hely28@mail.ru

Условия, необходимые для интергранулярного разрушения горной породы, возникают при измельчении методом объемного сжатия слоя материала, который реализуется в валковых дробилках высокого давления (роллер-прессах). Роллер-прессы все более широко распространяются в практике рудоподготовки благодаря их высокой производительности при малых энергетических затратах. Дробление методом объемного сжатия может быть имитировано с помощью гидравлической прессовой машины, что позволяет в контролируемых лабораторных условиях воспроизвести дробление между валками роллер-пресса и, таким образом, расширить исследования возможности и целесообразности применения роллер-технологии. Такое моделирование используется некоторыми исследователями, в основном, для расчета энергетических параметров измельчения [1], однако при этом недостаточно внимания уделяется селективности раскрытия минералов. Представленная работа имеет целью сравнение селективности дезинтеграции различными методами и оценку адекватности моделирования роллерного измельчения с помощью прессовой испытательной машины.

В качестве показателя степени селективности дезинтеграции, а также обогатительного разделения предлагается упрощенная формула Хенкока-Льюкена [3, 4]:

$$G_i = \gamma_i (\beta_i - \alpha) / \alpha, \text{ или } G_i = \varepsilon_i - \gamma_i,$$

где β_i , α – содержание компонента в i -том классе и в исходной пробе;

γ_i , ε_i – выход i -того класса и извлечение компонента в него.

Показатель G_i , или критерий селективности, может принимать как положительное, так и отрицательное значение, причем сумма положительных и отрицательных значений по всем классам крупности (продуктам) равна нулю. Легко увидеть пределы изменения G_i . При отсутствии разделения $\beta_i = \alpha$, извлечение, и выход равны 100 %, но $G_i = 0$, В случае идеального разделения, когда извлечение в некий продукт k равно 100 %, критерий G_k меньше 100 % на величину γ_k . Сумма G для всех остальных классов (или продуктов) равна $-G_k$.

Использование критерия селективности для оценки распределения элементов по классам крупности требует большого количества анализов вещественного состава. Это стало возможным благодаря современным методам анализа, таким, как рентгенофлюоресцентная и энергодисперсионная спектроскопия, дериватография, сканирующая электронная микроскопия. Большой объем полученных этими методами данных позволил в настоящей работе с высокой степенью достоверности выявить влияние метода дезинтеграции на качественные и технологические характеристики измельченных материалов.

Примером применения критерия селективности G может служить анализ результатов параллельного измельчения пробы медно-никелевой руды месторождения Соукер в шаровой и стержневой мельницах периодического действия. В опытах прослеживалась кине-

тика изменения гранулометрического состава, определялось содержание Cu и Ni в классах крупности, рассчитывался критерий селективности [5]. Было установлено, что в стержневой мельнице измельчение происходит быстрее, а при одинаковом количестве мелкого класса в продукте стержневого измельчения значитель-

но меньше крупных частиц. Более высокая селективность стержневого измельчения проявляется в том, что в самой мелкой фракции быстрее, чем при шаровом измельчении, накапливаются минералы меди и никеля и, соответственно, они быстрее удаляются из крупных классов (рис. 1).

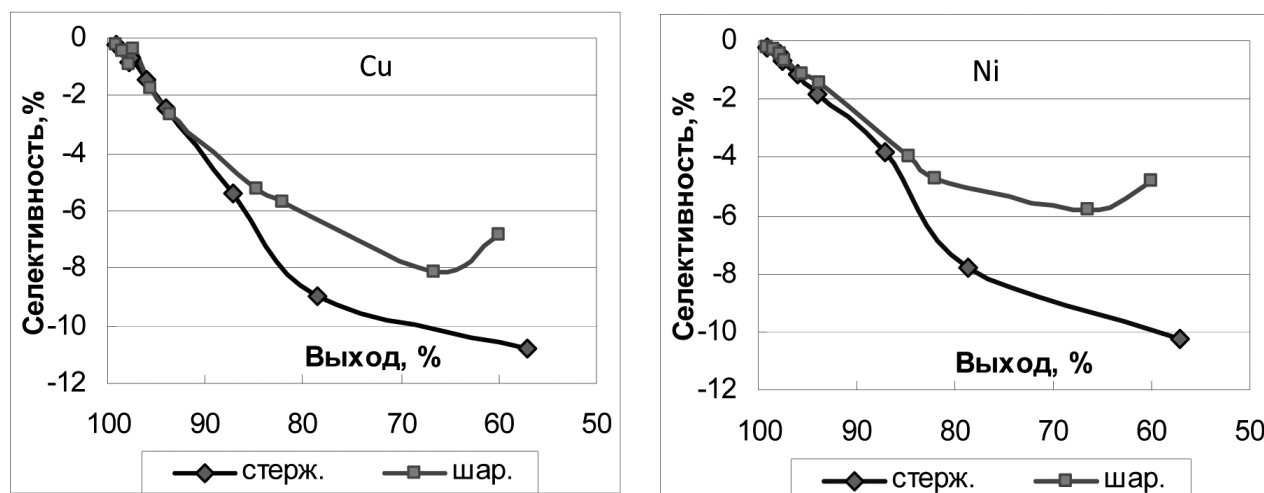


Рис. 1. Селективность извлечения меди и никеля из крупных классов (+45 мкм)

Моделирование дезинтеграции в роллер-прессе проведено с помощью прессовой испытательной машины. Параллельно в роллер-прессе и на прессовой машине проведено сравнение результатов измельчения одних и тех же исходных материалов с целью проверки близости технологических характеристик измельченных продуктов. Для этого были взяты пробы медно-молибденовой руды месторождения Нуркаган и медно-порфировой руды месторождения Кальмакыр, подготовленные дроблением в щековой дробилке до крупности – 12 мм. Подготовка проб и дезинтеграция в роллер-прессе проведены в ЗАО «Механобр-техника» под руководством докт. техн. наук А. В. Богдановича. Результаты измельчения в двух аппаратах сравнивались по гранулометрическому составу, содержанию основных элементов в классах крупности, селективности их распределения в классах, а также по результатам флотации материала – 100 мкм, выделенного из измельченных продуктов [6].

Опыты показали, что измельченные двумя способами материалы близки по гранулометрическому составу. Распределение количественной доли железа и меди по классам крупности после измельчения в роллер-прессе и под прессом при двух режимах практически одинаково. Для обоих методов измельчения характерна повышенная

концентрация Cu в мелких классах (для роллер-пресса в самом мелком) и уменьшение относительного количества Cu в крупных. Также близка для двух методов дезинтеграции закономерность распределения Zn.

Из каждого измельченного продукта был выделен класс – 100 мкм для флотации. Флотационные эксперименты не преследовали цель оптимизации процесса, получения высоких технологических результатов. Для объективного сравнения флотационных характеристик одних и тех же, но измельченных разными методами, материалов главным является соблюдение одинаковых условий флотации – аппаратуры, реагентного режима, продолжительности опыта и т. д. При выборе флотационных реагентов за основу был принят реагентный режим флотации Алмалыкской ОФ, для которой руды Кальмакыра являются основным сырьем. Флотационное обогащение всех продуктов было проведено при строго одинаковых условиях [7].

Данные, приведенные в таблице 1, показывают, что выход пенного и камерного продуктов, полученных при флотации класса – 100 мкм после измельчения в роллер-прессе и на прессовой машине, близки. Разница, наблюдаемая в отдельных случаях, может быть объяснена некоторым различием содержания элементов в исходном.

Для обеих руд по содержанию **Cu** и **S** в параллельных опытах получены весьма близкие результаты. Разница составляет по содержанию меди в концентрате 0,25 % (Кальмакыр) и 0,15 % (Нурказган), в хвостах – по 0,05 % для двух руд. По сере эта разница также незначительна. Обращает на себя внимание тот факт, что минералы, содержащие **Cu** и **S**, флотируются из руды Кальмакыра заметно активнее, что может объясняться более трудной обогатимостью руды Нурказгана и неоптимальными для нее выбранными условиями флотации.

Очевидна высокая чувствительность критерия **G**: при небольшом различии выхода продукта и содержания **Cu** или **S** его величина заметно изменяется. С учетом этого обстоятельства можно считать, что величины **G** для роллерного и прессового измельчения, рассчитанные по **Cu** и по **S**, различаются незначительно. При величине критерия по **Cu** около 50 (Кальмакыр) и 41 (Нурказган) разница для двух способов обработки составляет не более 6,8 единиц. Примерно то же наблюдается и для критерия **G** по сере.

Таблица 1

Результаты флотационных опытов. Роллер и пресс

Аппарат измельчитель	Вы- ход, %	Содержа- ние, %		Извлече- ние, %		Селектив- ность, %	
		Cu	S	Cu	S	Cu	S
Нурказган							
Роллер, к-т	8,73	2,80	2,45	49,78	43,72	41,06	34,99
Роллер, хв	91,27	0,27	0,30	50,22	56,28		
Роллер, исх		0,49	0,49				
Пресс, к-т	9,97	2,66	2,31	47,93	40,23	37,96	30,26
Пресс, хв	90,03	0,32	0,38	52,07	59,77		
Пресс, исх		0,55	0,57				
Кальмакыр							
Роллер, к-т	9,10	4,39	6,25	56,38	45,81	47,28	36,71
Роллер, хв.	90,90	0,34	0,74	43,62	54,19		
Роллер, исх.		0,71	1,24				
Пресс, к-т	10,30	4,63	7,05	64,71	54,72	54,41	44,42
Пресс, хв	89,70	0,29	0,67	35,29	45,28		
Пресс, исх		0,74	1,33				

Результаты экспериментов демонстрируют большое сходство процессов, происходящих в разных аппаратах, действие которых основано на эффекте объемного сжатия рудного материала и, следовательно, возможность моделирования на прессе роллерного измельчения.

В качестве примера определения целесообразности применения валковой дробилки высоко-

го давления в технологической схеме рудоподготовки проведено сравнение результатов флотационного обогащения руды Озерного месторождения, измельченной на прессовой машине и в шаровой мельнице. Для этой цели были использованы универсальная гидравлическая машина **SATEC 300DX**, оснащенная камерой одноосного объемного сжатия с возможностью регистрации нагрузочно-деформационной характеристики и шаровая мельница **МЛ-40** с камерой объемом 7 л.

Исходный материал представлен колчеданной свинцово-цинковой сульфидной рудой с преобладанием дисульфидов железа (пирита, марказита).

Пирит, содержание которого в пробе около 40 %, составляет основную часть колчеданной руды, образует скопления и вкрапленники. В среднем в этом минерале массовая доля железа 45,9 % и серы 52,3 %. Крупные кристаллы пирита размером 0,2 мм часто находятся в центре мелкозернистой марказит-сфалеритовой массы, которая внутри содержит зерна галенита. В кальците разрозненные кристаллы пирита размером 0,02×0,02 и 0,03×0,03 мм, находятся на контактах кальцита с массивной рудой.

Галенит, содержание в руде около 1 %. Очень сложные и тонкие сростания галенита, сфалерита, марказита и кальцита – основная форма взаимосвязи минералов руды. Размер этих сростков варьирует от десятых долей мм до сотых долей мм. Можно предположить, что расплывчатые, заливообразные контакты между минералами будет трудно разрушить в процессе измельчения руды. Характерны сростания пирита с галенитом. На рисунке 2 виден пористый, ячеистый и сотовый характер кристаллов галенита (вкрапления белого цвета). В колломорфных структурах встречается тонкодисперсный галенит, размер которого составляет от 5 до 10 мкм. Крупные агрегаты, до 0,5 мм встречаются в кварц-кальцитовых прожилках.

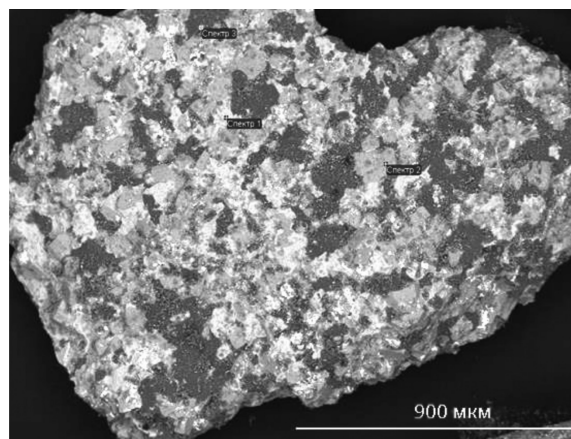


Рис. 2. Исходная руда, размер частицы 2 мм

При измельчении только в самых мелких классах можно установить некоторое увеличение массовой доли свинца по сравнению со средним содержанием в исходной руде. Сложный характер связи галенита со своими соседями, а также с карбонатами кальция и железа требует тонкого помола руды для освобождения галенита от сульфидов железа и цинка.

Сфалерит. Сфалерита в пробе руды около 10 %. Основной формой его нахождения является мелкозернистый агрегат с общим размером 0,1 до 5,0 мм с большим количеством вкрапленников галенита и пирита. Границы срастания сфалерита с пиритом правильные и четкие, с галенитом – размытые и заливообразные. Минимальный размер зерен сфалерита 0,07 мм. Почти вся медь Озерной руды (0,4–0,5 %) связана со сфалеритом за которым будет следовать по всем технологическим этапам переработки руды.

Карбонаты кальция, магния, марганца составляют до 30 % руды. В ней также присутствует около 9 % кварца, 6,5 % алюмосиликатов, а также в незначительном количестве рутил, ильменит, арсенопирит, барит, флюорит. В табл. 2 показан химический состав руды.

От исходной руды, подготовленной дроблением в лабораторной щековой дробилке до крупности –3 мм, были отобраны 2 пробы для измельчения двумя методами. Вес каждой пробы определялся производительностью последующих операций. Измельчение в каждом аппарате проводилось в 3–4 приема с имитацией замкнутого цикла: после каждого приема отсеивался материал флотационной крупности (–100 мкм) и добавлялся исходный. Измельчение в шаровой мельнице проводилось в течение 5, 10 и 20 мин., а под прессом – при давлении 55,7, 92,8, 129,9 и 158 МПа.

Продукты прессового измельчения при малых нагрузках содержат значительное количество крупных классов. Только самое большое нагружение дает продукт, сравнимый по содержанию мелкого класса с материалом 5 и 10-минутного измельчения в шаровой мельнице. В этом случае продукт прессового измельчения содержит больше крупных частиц и отличается более равномерным распределением материала по классам крупности в диапазоне –1+0,1 мм.

Количество класса –100 мкм после шарового измельчения заметно выше и он существенно мельче по сравнению с продуктами прессовой обработки. В отсеянном для флотации материа-

ле –100 мкм в случае шарового измельчения содержится значительно больше самой мелкой части, класса –40 мкм. Это можно считать проявлением переизмельчения. При прессовой обработке сrostки в большей степени разрушаются по поверхностям контакта минералов и в дальнейшем меньше подвергаются дополнительному разрушению.

Таблица 2

Элементный состав усредненной пробы руды

Элементы	Содержание, %
Свинец	1,03
Цинк	6,80
Сера	22,4
Медь	0,4
Железо	25,2
Золото	< 0,2 г/т
Серебро	72 г/т
Кальций	15,7
Кремний	10,8

Гранулометрический состав руды после каждого этапа измельчения показан в табл. 3.

Таблица 3

Измельченный продукт. Выход классов, %

Классы крупности, мм	Шаровая мельница, время измельч., мин.			Пресс, давление, МПа			
	5	10	20	55,7	92,8	129,9	158
+2	2,51	0,63		12	7	4	2
–2+1	8,33	1,50		39,5	33,5	28,5	13,5
–1+0,5	7,72	0,61		26	21,5	23,5	12,5
–0,5+0,25	18,32	3,84	2,93	10,5	20	17	12
–0,25+0,1	24,62	28,35	7,45	5,5	8,5	11,5	12
–0,1+0	38,50	65,08	89,62	6,5	9,5	15,5	48
Всего	100	100	100	100	100	100	100
Исходные для флотации, %							
–0,1+0,071	9,6	7,5	8,7	10,4	19,7	21,3	18,4
–0,071+0,04	15,6	20,2	23,0	7,0	24,6	21,1	24,7
–0,04+0	74,8	72,3	68,3	82,6	55,7	57,4	56,8
Всего	100	100	100	100	100	100	100

Флотация продукта –100 мкм в опытах после шарового и прессового измельчения проводилась в строго одинаковых условиях и дублировались. При этом не ставилась цель получения флотацией продуктов высокого качества, поэтому в опытах использовался минимум необходимых реагентов: собиратель, бутиловый ксантогенат, 100 г/т

и вспениватель, Т-80, 100 г/т. В случае значительного расхождения результатов опыты повторялись. Одноименные продукты дублированных опытов объединялись, определялись их гранулометрический состав и содержание основных элементов. Выход и гранулометрические характеристики продуктов флотации показаны в табл. 4.

Таблица 4

Крупность продуктов флотационных опытов. %

Классы крупн., мкм	Шаровая мельница. Время измельч., мин.			Пресс. Давление, МПа		
	5	10	20	55,7	92,8	129,9
Исходный						
–100+71	9,6	7,5	8,7	10,4	19,7	21,3
–71+40	15,6	20,2	23,0	7,0	24,6	21,1
–40+0	74,8	72,3	68,3	82,6	55,7	57,4
–100+0	100	100	100	100	100	100
Концентрат						
–100+71	3,0	2,3	1,4	1,2	5,0	6,0
–71+40	1,0	4,7	3,9	1,3	7,7	6,3
–40+0	16,8	21,4	11,8	28,5	23,8	25,7
–100+0	20,8	28,4	17,1	31,0	36,5	38,1
Хвосты						
–100+71	6,6	5,2	7,3	9,2	14,7	15,3
–71+40	14,6	15,5	19,1	5,7	16,9	14,8
–40+0	58,0	50,9	56,5	54,1	31,9	31,7
–100+0	79,2	71,6	82,9	69,0	63,5	61,9

Опыт показывает, что при прессовом измельчении существенно выше выход пенного продукта. Это происходит, в основном, за счет мелкого класса, –40 мкм, несмотря на более высокое содержание этого класса в исходном при флотации материала шарового измельчения.

По содержанию отдельных элементов в продуктах флотации материалы шарового и прессового измельчения заметно различаются. Из данных, приведенных в таблице 5, видно, что содержание цинка в концентрате флотации материала прессового измельчения стабильно. Различие при всех условиях нагружения составляет не более 0,5 %. При шаровом измельчении содержание цинка в пенном продукте заметно выше, однако прессовое измельчение за счет большого выхода пенного продукта позволяет получить гораздо более высокое извлечение рудных минералов. Данные вещественного состава продуктов флотации показывает также более высокое извлечение и содержание в пенном продукте прессового измельчения Fe и S. Это связано с переходом в пену, кроме руд-

ных минералов, других сульфидов, прежде всего, большого количества пирита, который в принятых условиях опытов не подавлялся депрессором. Это привело к некоторому разубоживанию концентрата по основным рудным элементам.

Таблица 5

Технологические показатели флотации

Показатели, %	Шаровая мельница. Время измельчения, мин.			Пресс. Давление, МПа			
	5	10	20	55,7	92,8	129,9	158
Выход конц., %	20,8	28,4	17,1	31,0	36,5	38,1	25,8
Zn, α	6,39	7,22	6,82	5,76	6,89	7,01	7,04
Zn, β	12,33	13,23	20,08	11,9	11,45	11,69	11,52
Zn, в	4,83	4,08	4,04	3,03	4,28	4,13	5,48
Zn, ε	40,14	52,07	33,19	64,0	60,7	63,5	42,2
Zn, G	19,34	23,67	16,09	33,0	24,2	25,4	16,4
Fe, α	26,57	28,51	32,41	30,76	29,87	32	
Fe, β	24,68	27,06	25,73	33,05	30,56	33,92	
Fe, в	27,07	29,08	33,79	29,45	29,45	31,33	
Fe, ε	19,32	26,96	13,57	39,21	38,98	27,35	
Fe, G	-1,482	-1,441	-3,525	2,712	0,876	1,55	
S, α	11,84	13,3	15,49	12,79	12,6	14,13	
S, β	15,93	18,55	20,09	20,23	18,6	22,27	
S, в	10,77	11,22	14,54	8,52	8,91	11,3	
S, ε	27,98	39,61	22,18	57,71	56,23	40,66	
S, G	7,177	11,21	5,079	21,21	18,13	14,86	

Рассматривая селективность флотации, можно отметить, что, несмотря на более высокое качество концентрата при шаровом измельчении, критерий селективности по основному рудному элементу, цинку, после прессовой обработки заметно выше, хотя в целом его величина при принятом режиме флотации невелика. Значения селективности по железу и сере подтверждают отмеченное выше разубоживание концентрата сульфидами, прежде всего, пиритом.

Закключение

В работе показано существенное различие измельчения в шаровой и стержневой мельницах в распределении меди и никеля по классам крупности, по скорости процесса, гранулометрическому составу продуктов измельчения. Скорость измельчения, оцениваемая по скорости накопления мелкого класса, в стержневой мельнице примерно в 1,5 раза выше, чем в шаровой при меньшем переизмельчении. Минералы, содержащие Ni и Cu, в стержневой мельни-

це быстрее удаляются из крупных классов и переходят в мелкий. Это свидетельствует об избирательности измельчения.

В настоящей работе приводятся результаты прямого сравнения измельчения одного и того же рудного материала двумя методами: в шаровой мельнице и на прессовой испытательной машине. В проведенных ранее исследованиях показана возможность и объективность моделирования роллер-измельчения с помощью гидравлического пресса, поэтому данные прессового измельчения, полученные в представленной работе, могут рассматриваться как результаты роллерной обработки.

Работа выполнена на полиметаллической руде Озерного месторождения. Минералогический анализ пробы показал, что руда представляет собой очень сложные и тонкие срастания основных рудных минералов – галенита, сфалерита, марказита и кальцита при весьма высоком содержании пирита.

Основное внимание уделено сопоставлению гранулометрического состава измельченных проб, результатам последующего обогатительного разделения – качеству полученных продуктов, распределению элементов по классам крупности. Полученные экспериментальные данные позволяют обнаружить и объяснить различие динамики процессов дезинтеграции и обогащения материалов при разных методах измельчения. Исследованиями установлено следующее:

- продукт прессового измельчения при содержании класса флотационной крупности (-100 мкм) близком к продукту шарового измельчения отличается более равномерным распределением материала по классам крупности в диапазоне $-1+0,1$ мм, но содержит больше крупных частиц;
- флотация класса -100 мкм, полученного прессовым измельчением, показывает значительно больший выход пенного продукта. Увеличение выхода происходит, в основном, за счет мелкого класса, -40 мкм, несмотря на то, что со-

держание этого класса в исходном значительно ниже. Соответственно, выход хвостов флотации материала прессового измельчения существенно меньше и они значительно крупнее, чем при шаровом измельчении;

– извлечение Zn при прессовом измельчении значительно выше, чем при шаровом. Разница достигает 20–30 % за счет большого выхода концентрата. Селективность, оцениваемая критерием G, также несколько выше при прессовом измельчении;

– при прессовом измельчении концентрат разубоживается, главным образом, пиритом, который в принятых условиях флотации не подавлялся реагентами.

Совокупность всех отмеченных фактов позволяет с достаточной степенью достоверности представить механизм дезинтеграции и флотации полиметаллической руды, измельченной двумя методами: в шаровой мельнице и на гидравлическом прессе.

При шаровом измельчении разрушение частиц руды происходит в большей степени неселективно, независимо от структурных особенностей частиц – минерального состава, трещиноватости, поверхностей срастания минералов. Поэтому в измельченном материале имеется, с одной стороны, больше сростков как в крупных, так и в мелких классах, а с другой – отмечается переизмельчение материала. Более высокая селективность раскрытия сульфидных минералов, как рудных, так и пирита, при прессовом измельчении приводит к повышению извлечения сфалерита и галенита и снижению качества концентрата из-за отсутствия реагента, подавляющего пирит.

В целом проведенное исследование подтверждает имеющиеся сведения о высокой селективности прессового измельчения и демонстрирует положительное влияние механизма объемного сжатия на результаты последующего процесса обогащения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелкомасштабное испытание для определения индекса работы измельчения в валковых дробилках высокого давления. Dave Bulled, Khiratt Husain and Carlos Lozano. SGS-Mineral Services, CANADA, 2008.
2. Васьков Д. С., Федотов П. К. . Моделирование процесса межчастичного измельчения в поршневом прессе. «Современные проблемы обогащения и глубокой комплексной переработки минерального сырья»

(Плаксинские чтения): Материалы международного совещания. Владивосток, 16–21 сентября 2008 г., Владивосток: 2008. С. 80–83.

3. Барский Л. А., Плаксин И. Н. Критерии оптимизации разделительных процессов. М., «Наука», 1967.
4. Краснов Г. Д., Чихладзе В. В., Шехирев Д. В. К оценке селективности разрушения руд. ОР № 4. 2011. С. 3–7.

5. Краснов Г. Д., Ракаев А. И., Шехирев Д. В., Чихладзе В. В. Кинетика и селективность измельчения медно-никелевой руды в барабанных мельницах. Цветные металлы, 2011. № 6. С. 11–15.

6. Краснов Г. Д., Чихладзе В. В., Богданович А. В., Кузьмин И. В. Технологическая характеристика

геоматериалов, дезинтегрированных методом объемного сжатия. Горный журнал, 2012. № 8. С. 102–107.

7. Краснов Г. Д., Чихладзе В. В. Влияние способа дробления руд на результаты их последующей флотации. Горный журнал, 2013. № 2. С. 109–112.

СЛОИСТЫЕ ПРИРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ КАК НОСИТЕЛИ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Николаев А. И., Герасимова Л. Г.

ИХТРЭМС КНЦ РАН, г. Анапты, nikol_ai@chemy.kolasc.net.ru

Слюда нашли массовое применение в различных отраслях промышленности. Их свойства в значительной степени зависят от дисперсности частиц, степени их тонины, от состояния поверхности. Наличие межплоскостных пространств позволяет использовать частицы слюд в качестве носителей компонентов, применяемых для модифицирования слюд и получения различных функциональных материалов. В данном сообщении мы рассматриваем использование широко распространенных слюд мусковита ($\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$) и флогопита ($\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) для синтеза пигментных и сварочных материалов с новыми свойствами. В качестве новых компонентов сварочных материалов рассмотрено также получение продуктов модифицированного соединениями легирующих элементов на основе лизардитового концентрата. Лизардит ($\text{Mg}_6[(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}]$) – минерал из группы серпентина.

Микродисперсные порошки с чешуйчатым строением частиц, обладающие перламутровым эффектом и/или проявляющие в определенных условиях свойства фотокатализатора, относятся к числу перспективных неорганических материалов, которые благодаря своим высоким декоративным и техническим свойствам, широко используются в лакокрасочной промышленности, при производстве пластмасс, бумаги, средств косметики и других продуктов [8]. Отличительными особенностями таких материалов являются их пластинчатая структура и высокий показатель преломления, что достигается созданием металлоксидного (например, диоксида титана, оксида железа и др.) нанопокрыва по всей площади слюдяных чешуек.

Схема подготовки слюды и нанесения на частицы наноксидного покрытия включает несколько стадий:

- расщепление слюды;
- измельчение расщепленной слюды и её классификация;
- нанесение гидроксидного покрытия на частицы слюды;
- модифицирование и термическая обработка оболочковой композиции с формированием на поверхности чешуек оксидного покрытия (температура 450–850 °C).

Способность слюды расслаиваться объясняется нарушением компенсированного гидратированным ионом калия отрицательного заряда пакета слюды. Расщепления слюды проводят термическим, химическим или электрохимическим путем. Наименьший эффект достигается при термическом воздействии, что обусловлено удалением из межслоевого пространства только кристаллизационной воды. Химическое и электрохимическое расщепление сопровождается извлечением некоторых катионов, что нарушает электронейтральности частиц, повышая их химическую активность [2, 9].

При расщеплении флогопита в системах с различной концентрацией химических реагентов (H_2SO_4 и Na_2SiF_6) из слюды извлекается калий, а также другие компоненты (магний, железо). Их степень выщелачивания зависит как от природы реагента, так и от его концентрации в жидкой фазе суспензии. На рис. 1 показано изменение содержания K_2O в жидкой фазе от концентрации серной кислоты в исходной суспензии. Следует отметить, что извлечение калия относится к диффузионным процессам, что обуславливает его высокую продолжительность – более 100 час [4].

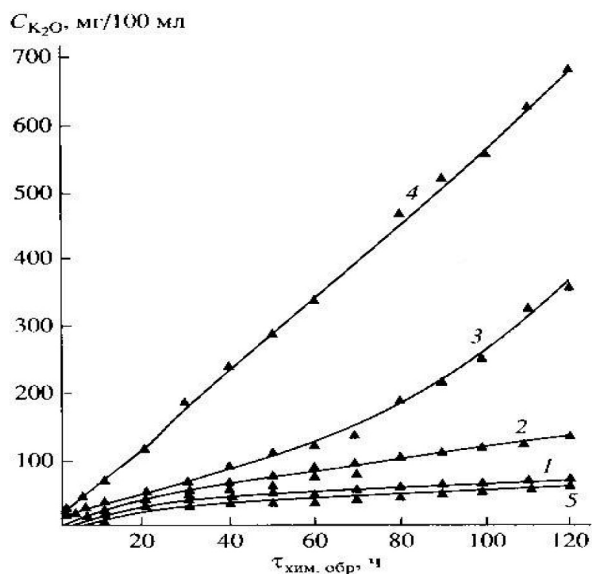


Рис. 1. Изменение содержания калия (K_2O) в жидкой фазе при химической обработке флогопита раствором H_2SO_4 , %: 0,5 (1), 1,0 (2), 2,0 (3), 5,0 (4) и 0,5 % Na_2SiF_6 (5)

При расщеплении слюды в водной суспензии электрохимическим способом также происходит выщелачивание ионов калия из межпакетного пространства. Некомпенсированные заряды плоскостей спайности разрывают пакет слюды. При этом, примерно, за 3 часа из флогопита извлекается 13,5 % K_2O , что, примерно, в 1,5 раза больше, чем необходимо для нарушения электронейтральности пакета, приводящей к расслоению слюдяных пакетов. Такие результаты были получены при следующих условиях: межэлектродное расстояние – 13 мм, напряжение на электродах – 220 в, максимальная плотность тока – 0,2 А/см². На рис. 2 по-

казана зависимость извлечения калия из флогопита от времени электрохимической обработки. При расщеплении слюды в водной суспензии электрохимическим способом также следует отметить, что безреагентный процесс положительно сказывается на состоянии поверхности частиц слюды. Отсутствуют дефекты, присущие химическому способу расщепления, при котором в процессе длительного контакта реагента с частицами слюды происходит выщелачивание не только межслоевых компонентов, но и элементов кристаллической структуры. Ниже приведены SEM-изображения слюдяных частиц (исходные и после расщепления) – рис. 3.

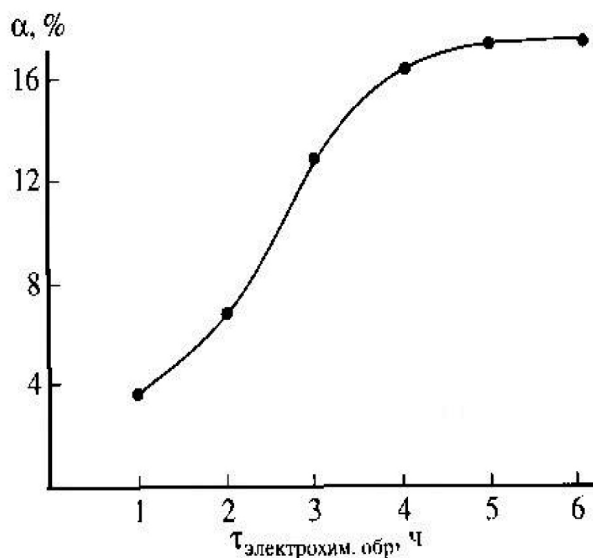


Рис. 2. Извлечение калия (α , % K_2O) из флогопита при его электрохимической обработке

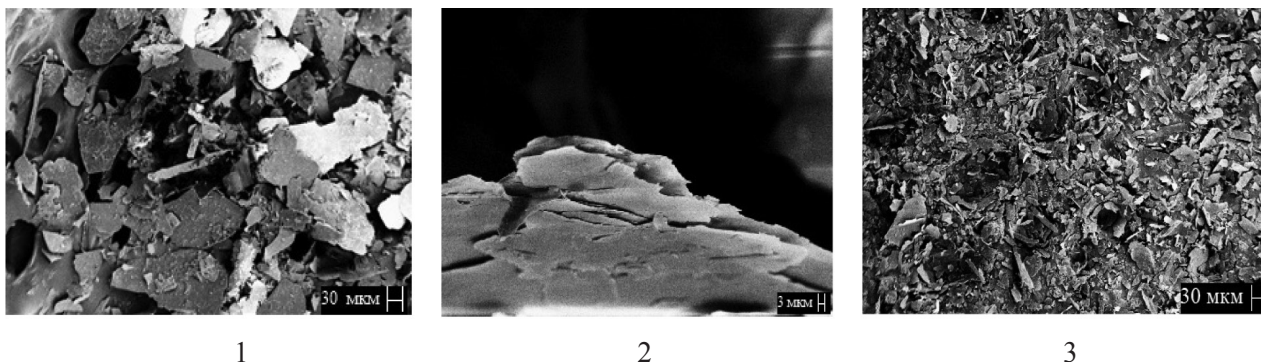


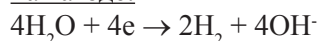
Рис. 3. SEM-изображение частиц слюды: 1 – исходная; 2 – частица после расщепления; 3 – после измельчения

Стадия нанесения гидроксидной оболочки титана, железа и др. на поверхность микрочастиц слюды осуществляется, как правило, термическим

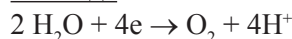
гидролизом суспензии, состоящей из сульфатных или хлоридных растворов названных выше компонентов и частиц подготовленной слюды [5].

Другой, на наш взгляд, более эффективный способ основан на электрохимическом процессе, который осуществляется в электролизной ячейке с анионообменной мембраной МА-40. Водную суспензию слюды (Т:Ж = 1:50, V = 50 мл) помещали в катодное пространство ячейки, анолитом служил 0,1N раствор серной кислоты (V = 25 мм). К электродам (катод – титан, анод – графит) подключали постоянный ток и сразу же начинали подачу в католит сернокислого титанового раствора (TiO_2 – 100 г/л), расход которого составляет – 20 % TiO_2 к массе слюды [5]. Механизм процесса, происходящего в указанных условиях, включает большое количество промежуточных реакций, которое суммарно можно представить следующим образом:

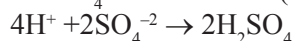
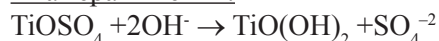
на катоде:



на аноде:



в камерах ячейки:



Частицы слюды, находящиеся в католите, служат центрами кристаллизации твердой фазы гидроксида титана (IV), который образуется в результате электрогидролиза титана(IV). Гидроксидный слой (оболочка) может покрывать чешуйки равномерно или создавать утолщения на их наиболее активных участках, чаще всего на краях (изломах). Кроме того, фаза гидроксида титана может осаждаться самостоятельно (не на поверхности чешуек). Все это оказывает существенное влияние на качество конечного перламутрового пигмента (ПП). Окончание процесса электрогидролиза достигалось при показателе рН католита 6–6,5. Затем суспензию из католита переносили на фильтр. Жидкую фазу отделяли, осадок промывали водой. Расход воды и количество кислых стоков в этом случае значительно меньше, чем в способе, основанном на термическом гидролизе. После подсушивания осадок прокаливали при 600–800 °С. Такой пигмент обладал хорошей укрывистостью [6].

При получении продукта с покрытием, обладающим фотокаталитическими свойствами, оболочковую композицию дополнительно модифицировали в присутствии специальных веществ, после чего подвергали термообработке при температуре не более 300 °С. В этих условиях формировалось

оксидное нанопокрытие со структурой анатаза (рис. 4). Полученный продукт не обладал укрывистостью. Он может быть использован в качестве фотокатализатора, например, при очистке воздуха от токсичных газов CO и NO. Данные по фотокаталитической активности приведены в работе [9].

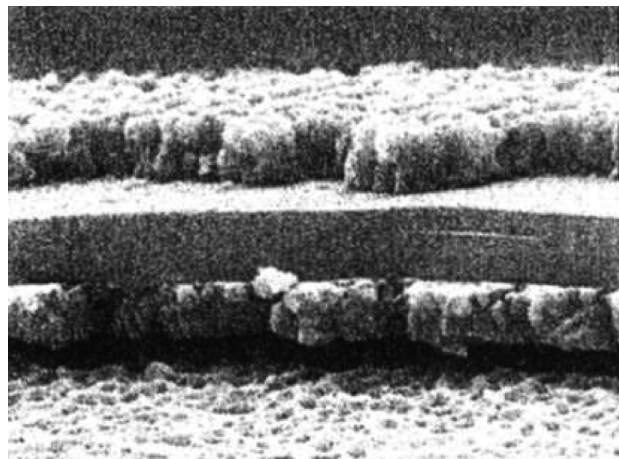


Рис. 4. Изображение частицы слюды, покрытой диоксидом титана

Низкое содержание в слюдах основных лимитируемых примесей для сварочных материалов – фосфора и серы – свидетельствует о возможном их использовании в составе покрытий электродов, как источников соединений калия, алюминия, магния и кремния. Но на практике оно сильно ограничено из-за высокого содержания в продуктах адсорбированной, межслоевой воды и гидроксидных соединений, способных увеличивать пористость металла шва, содержание водорода и неметаллических включений [3]. По этой причине исключено использование лизардитового концентрата. Потери прокаливания лизардита при 900 °С составляют 18,0–19,3 %, в то время как для мусковита и флогопита – менее 5 %.

Использование лазерного облучения для разрушения гидроксидов в слюдах оказалось эффективным [7]. Гранулометрический состав проб до облучения представлен в таблице 1, а после обработки на рисунке 5. Лизардитовый концентрат до обработки имел размер частиц менее 0,05 мм, флогопит и мусковит содержали от 20 до 35 % частиц +0,05 мм.

После лазерной обработки флогопита и мусковита образуются крупные полые шарообразные гранулы, в отличие от обработки минеральных концентратов, не содержащих гидроксидов [1]. Образование таких полых гранул объясняется вспучиванием многослойных частиц мусковита и флогопита при очень быстром удалении

из них паров воды. Из данных (рис. 5) можно заметить также, что с увеличением продолжитель-

ности облучения происходит увеличение гранул слюд.

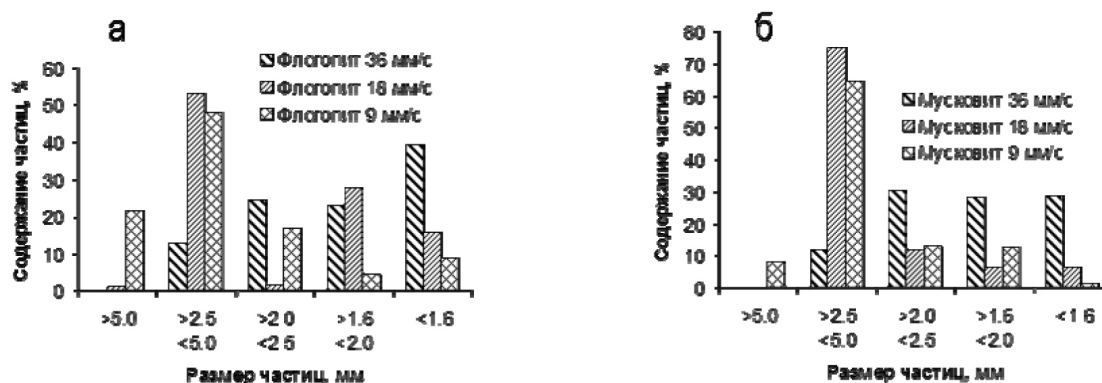


Рис. 5. Распределение обработанных гранул флогопита и мусковита по фракциям в зависимости от скорости обработки: а – флогопит, б – мусковит

На рис. 6 приведено SEM-графические изображения внешней поверхности частиц флогопита и мусковита. Явно просматриваются отвер-

стия, через которые выходили пары воды. При обычной прокалке слюд до 950°C образования сфер не наблюдалось.

Таблица 1

Гранулометрический состав концентратов до облучения лазером

Концентрат	Крупность фракции, мм / содержание мас, %						
	+0,100	+0,09	+0,08	+0,071	+0,063	+0,05	–0,05
Мусковитовый	0,18	0,37	1,95	3,10	3,12	27,8	63,5
Флогопитовый	0,88	0,58	2,54	3,06	4,1	9,2	72,9
Сунгулитовый	–	–	–	–	–	–	100

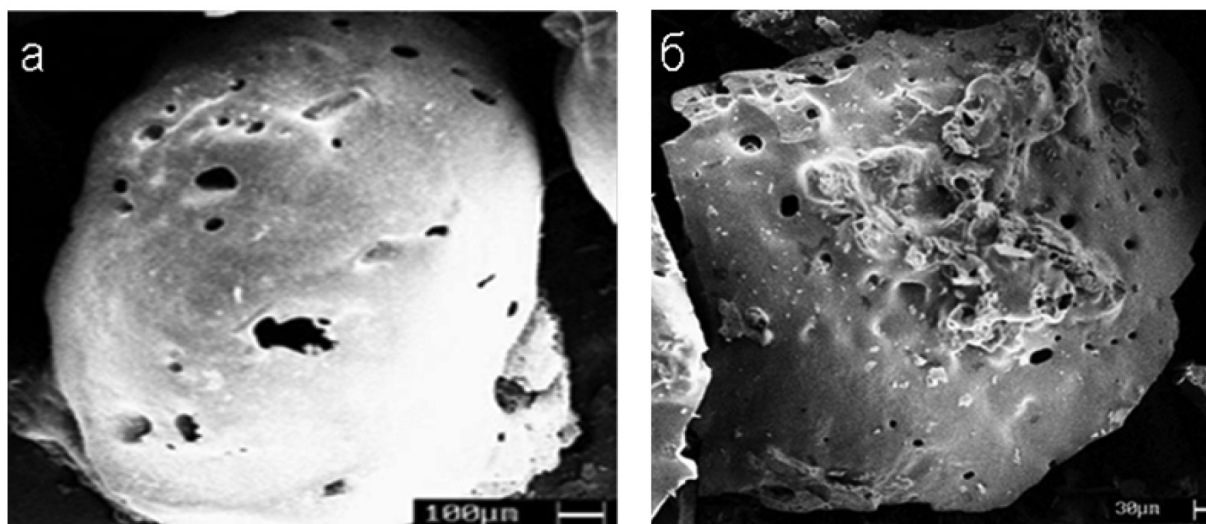


Рис. 6. SEM-изображения гранул флогопита (а) и мусковита (б) после лазерной обработки

После облучения лизардита крупные сферические гранулы не образовывались, вероятно, из-за меньших размеров частиц исходного продукта. Термограммы слюд после обработки лазером показывают, что потерь веса при дополнительном прокаливании практически нет [1]. Это

свидетельствует о том, что при облучении произошло разрушение гидроксидов. Выдерживание продуктов на открытом воздухе в течение 3 месяцев также не привело к изменению их веса. Это не подтверждает имеющееся мнение о гигроскопичности прокаленных слюд. Поэтому

можно ожидать, что обработанные лазером слюды не будут иметь ограничений по их использованию из-за присутствия гидроксидов.

По данным РФА лазерная обработка флогопита и мусковита сопровождается частичной их аморфизацией. Рентгенограмма гранул обработанного флогопита свидетельствует об образовании фостерита (Mg_2SiO_4), муллита ($\text{Al}_{2,25}\text{O}_{4,875}\text{Si}_{0,75}$), алюминиевого магнезиоферрита (MgFeAlO_4) и клиноэнстатита (MgSiO_3). Состав рентгеноаморфной фазы требует дополнительного изучения.

Модифицирование слюд соединениями цветных и редких элементов (Cu(II) Ni(II) Co(II) Ti(IV) Nb(V) Sr(II) , РЗЭ (III)) выполнялось с целью последующего использования их в качестве эффективных материалов для сварочных электродов. Метод модифицирования основан

на сорбции указанных элементов из хлоридных или нитратных растворов с переменной концентрацией.

Содержание извлекаемых ионов металлов в пересчете на оксиды металлов в прокаленных концентратах изменялось от 1 до 6 % масс. в зависимости от их концентрации в водных растворах перед сорбцией [1]. Отмечено, что модификаторы распределяются равномерно в концентратах. Аналогичный эффект не достигался при механическом смешивании слюд с малым количеством твердых соединений легирующих добавок. Таким образом, использование синтетических компонентов сварочных материалов, модифицированных РЗЭ, Nb, Sr, цветными металлами, позволит упростить регулирование их концентрации в составе покрытия электрода, а следовательно, и в составе металла шва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адкина Ю. В., Николаев А. И., Петров В. Б., Путинцев Н. М. Легирующие элементы в минеральных и синтетических компонентах сварочных материалов // ЖПХ. Т. 83. № 12. С. 1960–1964.
2. Бассет Ф. А. Роль ориентировки гидроксила при изменении слюд / В кн.: Вопросы геологии и минералогии слюд. М.: Мир, 1965. С. 218–227.
3. Баранов А. В., Брусницын Ю. Д., Кашенко Д. А., Боков А. А. Совершенствование технологии производства сварочных электродов // Автоматическая сварка, 2005. № 12. С. 43–44.
4. Герасимова Л. Г. Гершенкоп А. Ш. Хошуля М. С. и др. Физико-химические основы получения чешуйчатого перламутрового пигмента // Неорганические материалы. 2001. Т. 37. № 5. С. 631–635.
5. Герасимова Л. Г., Охрименко Р. Ф. Изучение гидролиза титана (IV) в сульфатно-аммонийных растворах при получении перламутровых пигментов на основе слюды // ЖПХ, 1997. Т. 70. № 12. С. 1023–1028.
6. Герасимова Л. Г., Жданова Н. М. Получение перламутрового пигмента методом электролиза // ЛКМ, 1995. № 6. С. 8–10.
7. Петров В. Б., Адкина Ю. В., Попов В. О., Николаев А. И., Малышевский В. А., Быченя Ю. Г. Поведение компонентов сварочных материалов при лазерной обработке // Хим. технология, 2010. № 5. С. 281–287.
8. Фролова Л. П. // ЛКМ, 1984. № 2. С. 62–63.
9. Ferro Z. P. and W. A. Stewart. Mica // KMC Minerals. Inc. Engineering. June 1988. Vol. 40. N 6. P. 428–429.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ТЕРМООБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАРЦА МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЙСКОЕ

Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П.

Институт геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

В схемах глубокого обогащения кварца важная роль отводится процессам дезинтеграции. В России и зарубежных странах на промышленном уровне операции рудоподготовки, как правило, включают 2–3-х-ступенчатое дробление и измельчение в замкнутом цикле с классификацией по заданному классу, что позволяет снизить потери со шламами. Для уменьшения энергоемко-

сти операций по дроблению используются различные подходы, основанные на свойствах кварца, – механическое, термическое, и реже электроимпульсное [1].

Кварцсодержащее сырье чаще всего подвергают дезинтеграции термообработкой, затем измельчают до крупности $-0,5+0,1$ мм и традиционно очищают в смеси соляной и плавиковой

кислот [2, 3]. Следует учитывать, что широко используемая термообработка имеет свои преимущества и ограничения, так как в зависимости от режима, индивидуального в каждом случае, значительная часть примесей, находящихся в структурных каналах (натрий, алюминий, германий и др.) может войти в кристаллическую решетку кварца. Поэтому использование термической обработки на начальных стадиях может привести к загрязнению кварца структурными примесями. Влияние способа термообработки нами изучено на кварце золоторудного месторождения Майское, который рассматривается как нетрадиционный тип кварцевого сырья.

Минералого-технологические исследования [4] показали, что для жильного кварца данного месторождения характерно наличие большого количества минеральных включений различного размера. Микропримеси, отрицательно сказывающиеся на качестве концентрата, представлены кальцитом, альбитом, калиевым полевым шпатом и мусковитом. Для кварца выделены три технологических типа (табл. 1). Зернистые агрегаты на оруденелых интервалах интенсивно гра-

нулированы. В жильном кварце встречается как мелкозернистый, так и средне-крупнозернистый кварц. Цвет кварца меняется от белого до темно-серого без видимой закономерности.

Таблица 1

Технологические типы кварца золоторудного месторождения Майское

Тип кварца	Проба	Характеристика кварца
1	М-1	Белый зернистый
2	М-2	Молочно-белый сливной
3	М-3	Светло-серый до темно-серого

Для выяснения влияния термообработки на качественные характеристики типов кварца, проведена серия экспериментов. Термообработка проводилась при температурном режиме ниже температуры $\alpha \leftrightarrow \beta$ -перехода и выше 600 °С.

Изменение физических характеристик кварца (истинная и средняя плотность, пористость) зафиксировано уже при минимальной температуре термообработки – в 300 °С (табл. 2).

Таблица 2

Физические свойства кварца по типам

проба	Средняя плотность, г/см ³		Истинная плотность, г/см ³		Пористость, %	
	Исходный	Термообработан	Исходный	Термообработан	Исходная	Термообработан
М-1	2,65	2,64	2,66	2,64	0,75	0,19
М-2	2,64	2,63	2,65	2,64	0,38	0,38
М-3	2,65	2,63	2,66	2,64	0,19	0,38

Исследования показали, что термообработка кварца данного месторождения при определенных режимах проявляет интересные особенности (рис. 1):

– все разновидности кварца после термообработки приобретают молочно-белый цвет;

– наблюдается значительное разупрочнение, увеличивается хрупкость – кварц раскашивается до мелкой крупки (3–5 мм) руками. Соответственно увеличивается удельная поверхность.

– на поверхности кварца проявляются пленки и корочки бурого и темного цветов.

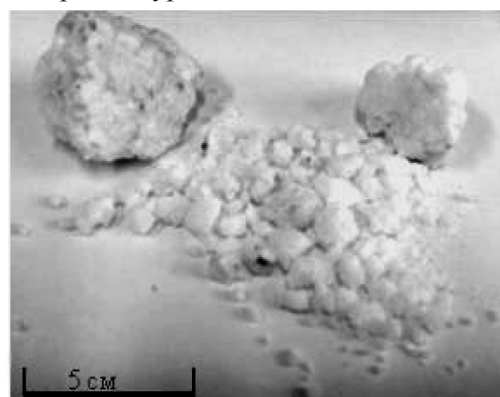


Рис. 1. Кварц до (а) и после обжига (б)

Интенсивное разупрочнение кварца, по всей видимости, обусловлено высокой напряженностью внутри зерен исходного кварца, которая подтверждается наличием большого количества пластинок деформаций и деформационных из-

гибов, видимых по шлифам и на поверхности зерен (рис. 2). Высокая напряженность в результате термообработки уходит за счет разупрочнения зерен по границам и зонам микродеформаций (рис. 3).

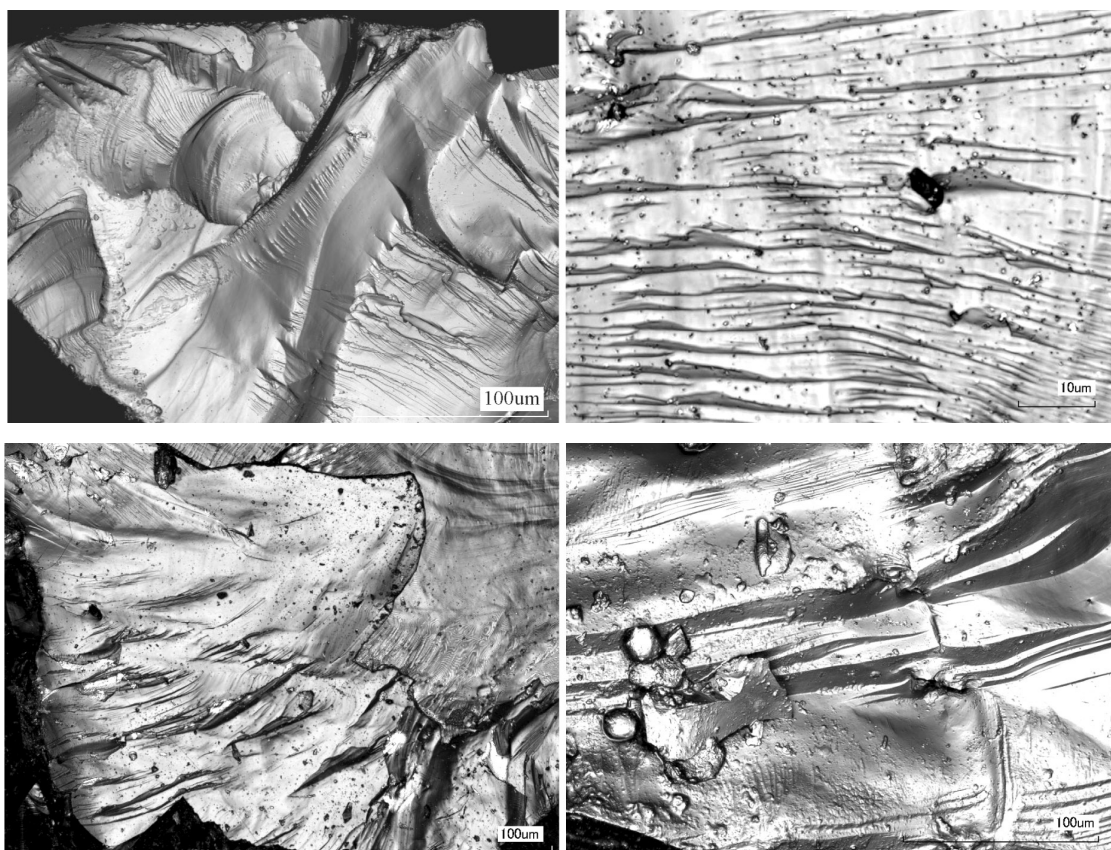


Рис. 2. Микродеформации, выходящие на поверхность зерен кварца (лазерный микроскоп Color 3D VK-9710K)

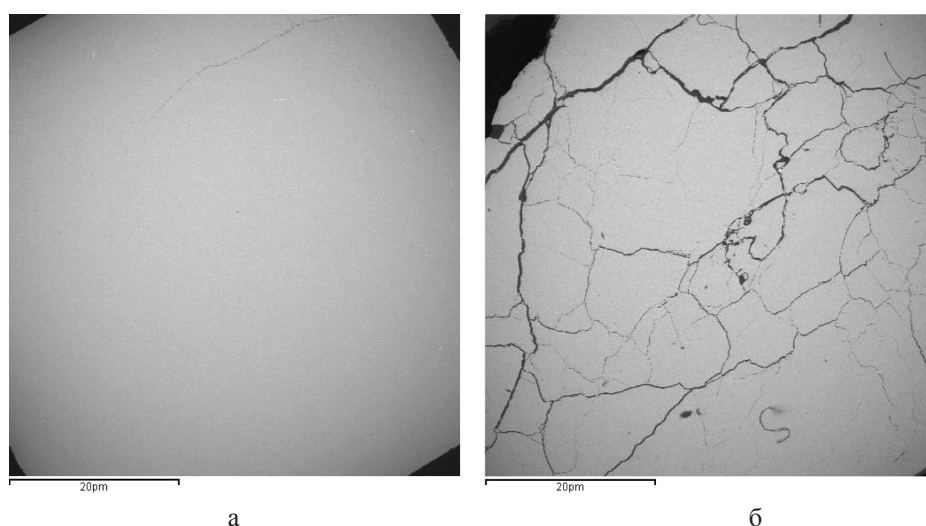


Рис. 3. Фото пластинок кварца: а – до обжига, б – после обжига (СЭМ VEGA II LMU)

Разупрочнение поверхности происходит также за счет образования и укрупнения пор,

иногда занимающих значительные площади (рис. 4).

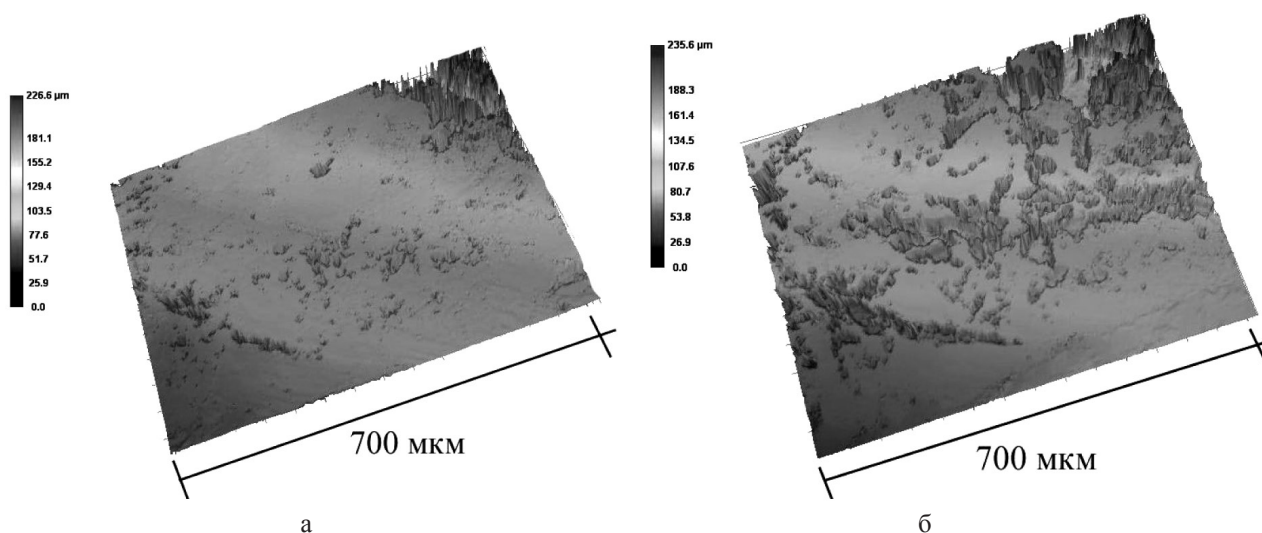


Рис. 4. Образование пор в кварце, происходящее в результате термообработки, проба М-1 (лазерный микроскоп Color 3D VK-9710K)

Влияние способа охлаждения термообработанного в течение 30 мин при температуре 300 °С на физико-химические изменения в кварце показаны на примере второго типа (М-2), как наиболее распространенном на месторождении (табл. 3).

Количественно изменение прочностных характеристик кварца при термообработке определяли на гидравлическом прессе путем сжатия и доведения до разрушения образцов (кубиков размером 3 × 3 × 3 см) (табл. 4).

Таблица 3

Режимы термообработки кварца второго типа

Температура °С	Режим охлаждения			
	Гашение водой	Остывание на воздухе	Остывание в муфельной печи	Примечание
300	На куске появилась бурая пятнистость. Трещиноватость проявлена слабо. На тонком сколе отваливаются мелкие кусочки размером 4 × 4 мм и менее	На куске появилась пятнистость бурого оттенка. Трещиноватость не проявлена. На тонком сколе по трещинке откалываются кусочки размером 10 × 5 мм	На куске появилась пятнистость бурого оттенка. Трещиноватость проявлена более сильно, чем при гашении водой. На тонком сколе по трещинке отваливаются мелкие плоские кусочки размером до 20 × 15 мм	После остывания кварц легко разминается руками

Таблица 4

Изменение прочностных характеристик типов кварца при термообработке

Технологический тип кварца и проба	Среднее значение прочности, кгс/см ²		Снижение прочности при термообработке, раз
	Исходный кварц	Термообработанный при 300°С	
М-1	1835	82,3	22,3
М-2	1244,7	783,7	1,59
М-3	3116,7	851,8	3,66

Прочность кварца по типам после термообработки при температуре 300° С меняется в широких пределах. Минимальные показатели у зернистого кварца первого типа (М-1). При более высоких температурах кубики не сохраня-

ют форму и рассыпаются. Для выявления зависимостей, связанных с прочностными характеристиками, проведен анализ поверхности термообработанного кварца по микроснимкам пластинок кварца (рис. 5).

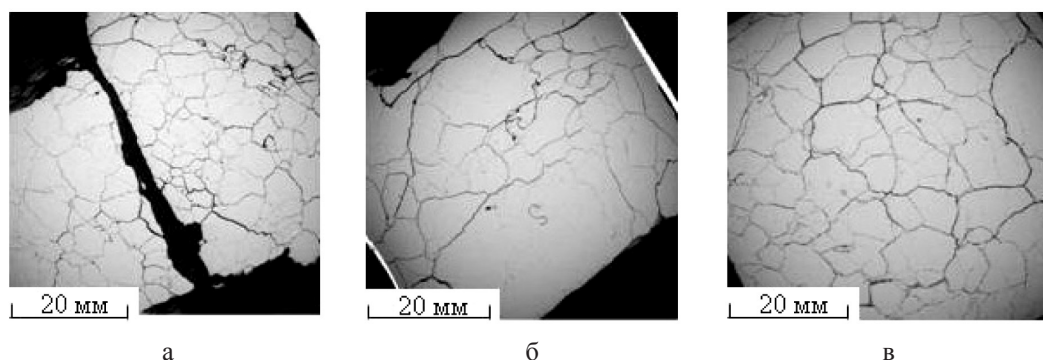


Рис. 5. Наведенная термообработкой трещиноватость кварца различных проб:
а – М-1; б – М-2, в – М-3 (СЭМ VEGA II LMU)

Сопоставление термообработанных образцов показывает наличие, по крайней мере, двух систем глубоких трещин, приводящих к дезинтеграции кварца на разновеликие по размеру зерна, обеспечивая снижение энергоемкости процессов измельчения, что согласуется с литературными данными [5]. Изучение поверхности после термообработки позволяет рассчитать теоретически ожидаемую granulometriю кварца после дробления (табл. 5).

Таблица 5

Расчетная granulometрия зерен в термообработанном кварце по типовым пробам

Размер зерен, мм	Встречаемость по типовым пробам, %		
	М-1	М-2	М-3
3–6	46	42	24
6–9	33	40	43
9–12	13	15	21
12 и >	8	3	12

Влияние режима термообработки на granulometriю дробленного в щековой дробилке (ДЩ 60×100, ОАО «МЕХАНОБР-ТЕХНИКА») в оди-

наковых условиях (двукратное пропускание) кварца иллюстрируется рис. 6.

Анализ данных показывает, что с экономических позиций наиболее эффективна термообработка, осуществляемая нагревом отсортированных кусков крупностью 90–100 мм в электропечи до температуры, выше фазового перехода (600 °С). Медленное остывание в муфельной печи и резкое с охлаждением водопроводной водой (рис. 6 – а, в), обеспечивает более равномерное распределение материала по крупности при дезинтеграции. Заметного влияния изменений температур нагрева на granulometрический состав проб, остывание которых производилось на воздухе, не наблюдается. Однако, если рассматривать дезинтеграцию материала термодроблением с позиций последующего обогащения, при высоких температурах (600 °С) часть структурных примесей может войти в кристаллическую решетку и отрицательно сказаться на качестве сырья.

Влияние режимов термообработки кварца на параметры кристаллической решетки и индекс кристалличности, определяли на дифрактометре ARL X'TRA, Thermo Fisher Scientific. (табл. 6).

Таблица 6

Параметры кристаллической решетки кварца

Режим термообработки		пробы	а, Å	с, Å	V, Å ³	h	инд. кр.
Т°С	способ охлаждения						
300	гашение водой	3/1	4,9135	5,4051	113,01	0,29	8,0
	на воздухе	3/2	4,9136	5,4053	113,02	0,30	7,6
	вместе с печью	3/3	4,9135	5,4050	113,01	0,28	7,89
500	гашение водой	2/1	4,9134	5,4051	113,01	0,28	8,0
	на воздухе	2/2	4,9136	5,4055	113,02	0,28	7,4
	вместе с печью	2/3	4,9136	5,4052	113,02	0,31	7,8
600	гашение водой	1/1	4,9137	5,4055	113,03	0,31	7,0
	на воздухе	1/2	4,9136	5,4052	113,02	0,30	8,0
	вместе с печью	1/3	4,9135	5,4051	113,01	0,31	7,7

Аналитик И. С. Инина. Погрешность определения параметров а и с – ± 0,0001 Å

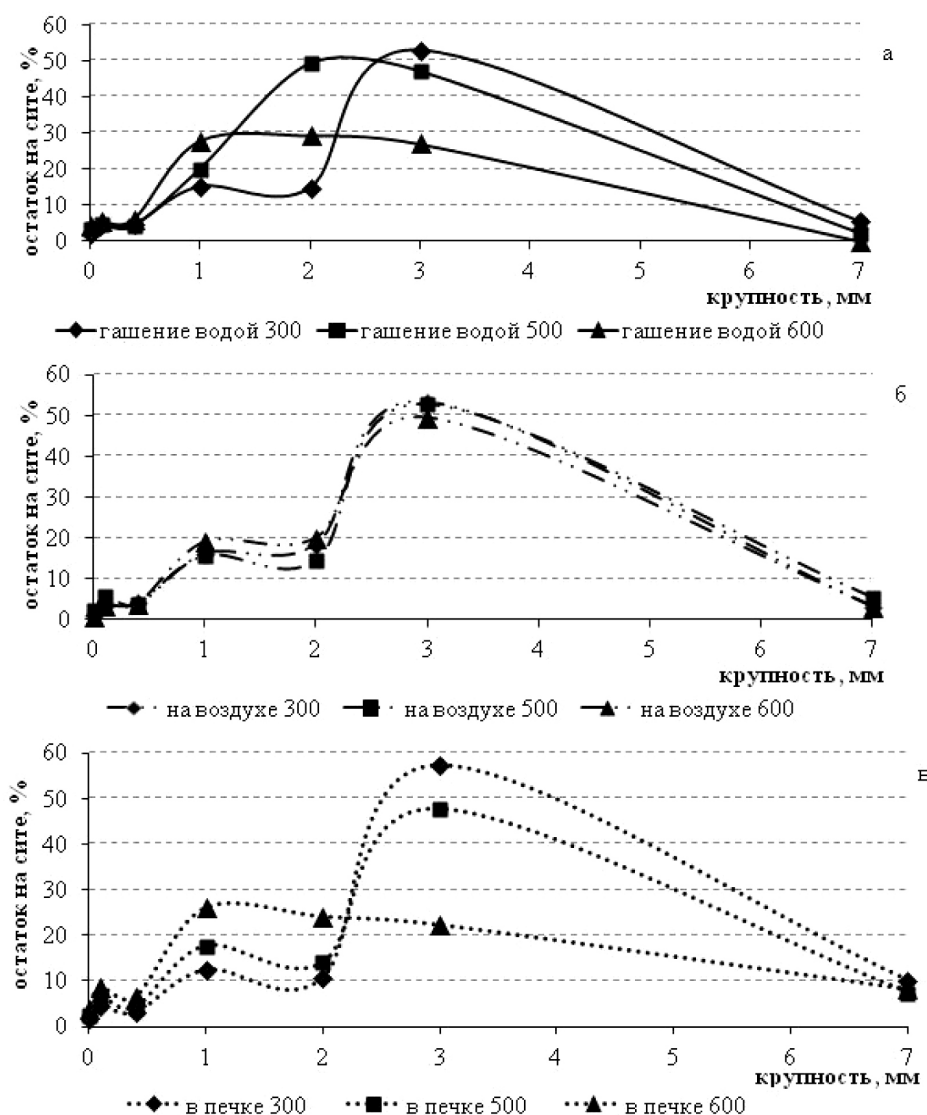


Рис. 6. Гранулометрия термообработанного в разных режимах кварца (проба М-2) с остыванием после нагрева: а – гашение водой; б – на воздухе; в – в печи

Отмечены некоторые колебания параметров а и с элементарной решетки кварца по типовым пробам, что подтверждает неоднородность кварца. Индекс кристалличности кварца колеблется в зависимости от способа охлаждения. Максимальные значения достигаются при гашении водой для кварцев 2 и 3 типов, для кварца первого типа – при остывании на воздухе

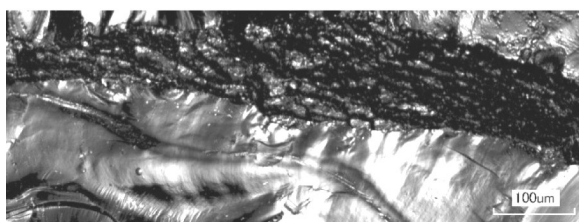
Объемный анализ изменения поверхности кварца при термообработке (температура 6000 °C) проведен на 3D цветном сканирующем лазерном микроскопе VK-9700 Generation. Для повышения достоверности данных, откалывались максимально возможно плоские образцы, которые перед анализом тщательно очищались. Изучение сколов и характера поверх-

ности проводилось до и после обжига в одних и тех же точках. На микрофото (рис. 7) видно, что после термообработки на образцах кварца появляются микротрещины, локализация которых не связана с минеральными примесями.

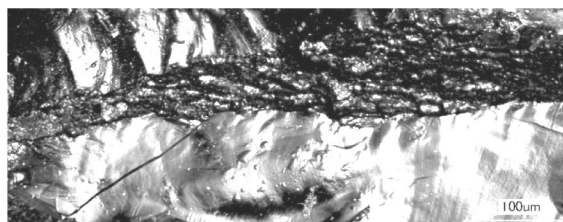
На микрофото (рис. 8) отражено изменение рельефа поверхности в результате термообработки, заключающиеся в выгорании отдельных минеральных примесей (рис. 8 – а, б). Анализ поверхности показал полное выгорание газово-жидких включений (рис. 8 – в, г, точки 1, 5). На месте газово-жидких, с кристаллической составляющей, включений, после термообработки (рис. 8 – в, г, точка 2) остаются невыгоревшие «остатки» твердой фазы включений

(рис. 8 – д), размеры которых достигают 1,5 – 2 мкм (рис. 8 – е). Минеральные примеси на дан-

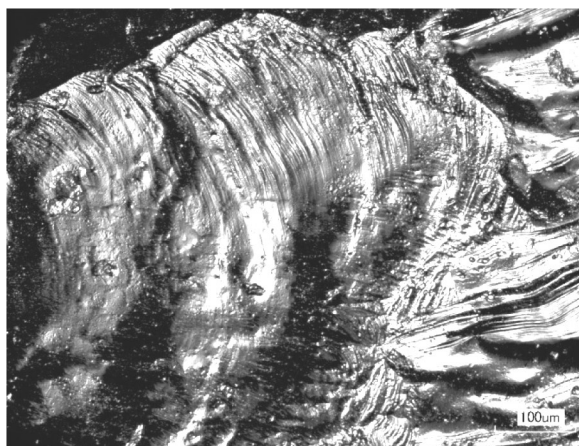
ном участке (рис. 8 – в, г, точки 3, 4) практически не удалились.



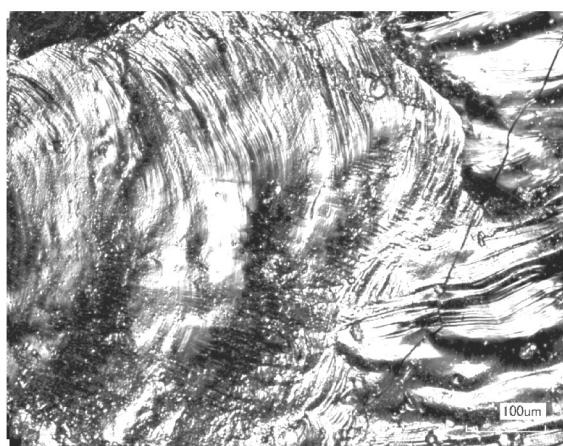
а



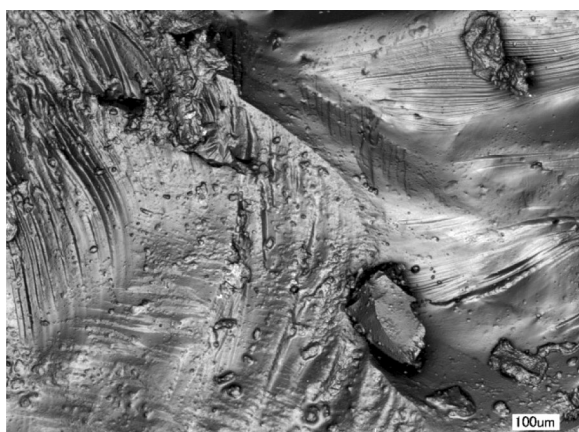
б



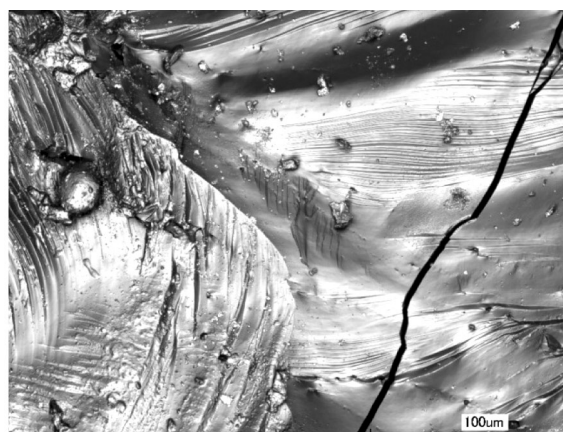
в



г



д



е

Рис. 7. Изменение поверхности кварца при термообработке типовых образцов :
а, б – М-1; в, г – М-2; д, е – М-3 (лазерный микроскоп Color 3D VK-9710K)

Проведенные предварительные исследования по термообработке кварца данного месторождения показали многообразие эффектов, сопутствующих процессу обжига и охлаждения.

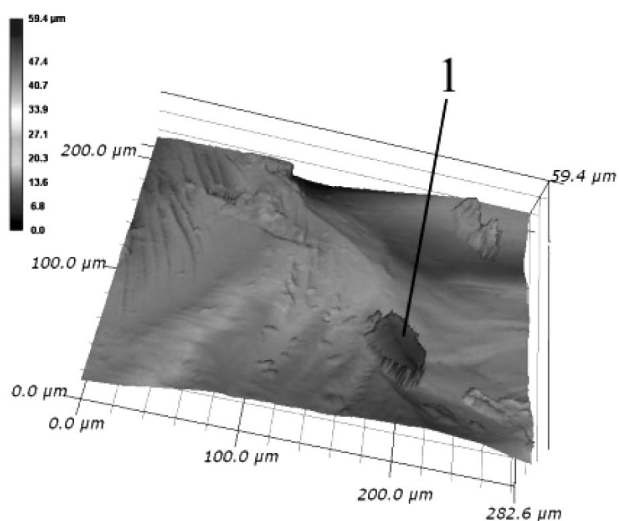
Изменениям физико-механических характеристик (плотность, водопоглощение, пористость, прочность) сопутствуют и изменения рельефа поверхности.

Необычное поведение кварца месторождения Майское при термообработке следует учитывать при разработке технологии рудоподготовки и обогащения. Это потребует до-

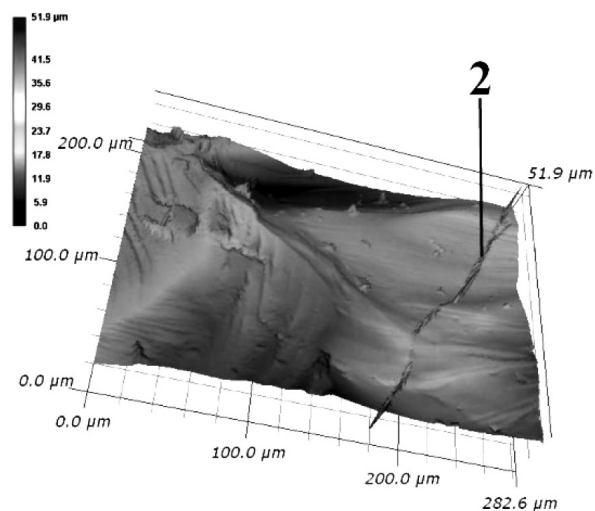
полнительных геолого-петрографических исследований.

Разупрочнение кварца при термообработке и образование гранул, прочность которых определяется режимом термообработки является основанием для поиска новых областей его использования.

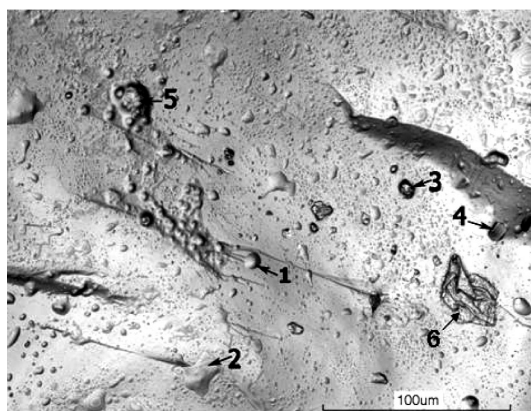
Работа выполнена в рамках проекта «Геологическая и минералого-технологическая оценка кварцевого сырья Карело-Кольской кварценозной провинции – нового перспективного региона России» Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №27.



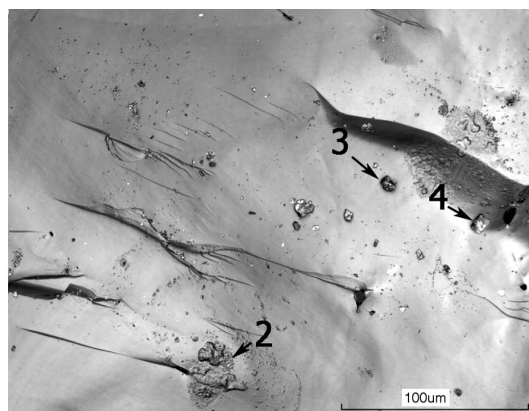
а



б



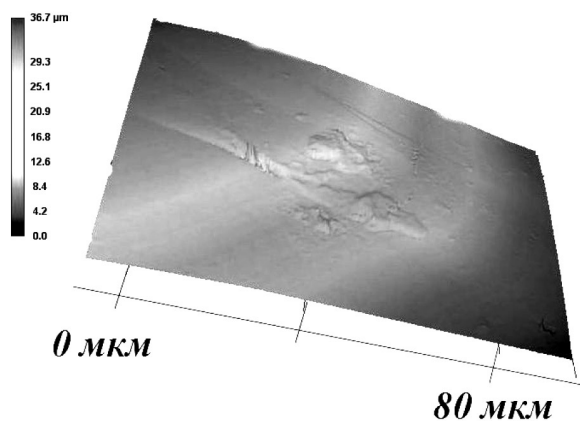
в



г



д



е

Рис. 8. Микрофото 3D модели поверхности жильного кварца (проба М-2) до и после термообработки при 600 °С: а, б – 1 – выгорающая минеральная микропримесь, 2 – вновь образующаяся микротрещина; в, г – 1, 5 – ГЖВ, 2 – ГЖКВ, 3, 4 – минеральное включение (лазерный микроскоп Color 3D VK-9710K)

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые методы разрушения горных пород // Емелин М. А., Морозов Н. П. и др. М.: Недра. М. 1990. 240 с.
2. Исаев В. А. Термические превращения молочно-белого кварца. М.: МГУ. 2003. 97 с.
3. Тиунов Ю. А. Способ обогащения кварцевого сырья. Патент РФ 2182113. 2007
4. Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Предварительные данные минералого-

технологических исследований кварца золоторудного месторождения Майское (северная Карелия) // Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии (сб. ст. по матер. докл. VII Российского семинара по

технологической минералогии). Петрозаводск. 2013. С. 117–122.

5. Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке // Азбель Е. И., Баранов Е. Г., Изюмко В. М. и др. М.: Недра. 1987. 307 с.

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ КВАРЦЕВЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ КАК НЕТРАДИЦИОННОГО ИСТОЧНИКА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

Светова Е. Н., Скамницкая Л. С., Светов С. А.

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, ensvetova@igkrc.ru

Проблема обеспеченности промышленности высокочистыми кварцевыми концентратами диктует необходимость поиска новых нетрадиционных типов кварцсодержащих пород как сырья для получения высоколиквидных кварцевых продуктов. Предпосылкой для исследования таких пород в России служит опыт американской компании Юнимин (Unimin), которая производит высокочистый кварцевый концентрат под брендом Iota, перерабатывая аляскитовые граниты с содержанием кварца в исходной породе 20 % кварца, и демонстрирует реальность получения высокочистого концентрата кварца из полиминеральных пород [8]. На территории Карелии имеют широкое распространение кварциты, кварцевые конгломераты и гравелиты, кварцевые порфиры, кремнистые сланцы, кварцевые конгломераты. В данной статье авторы рассматривают в качестве возможных нетрадиционных источников кварцевого сырья палеопротерозойские кварцевые конгломераты, слагающие горизонт в стратиграфическом разрезе Центральной Карелии в р-не п. Гирвас. В настоящей работе рассмотрены минералогическо-геохимические особенности галечного кварца из конгломератов и предпринята попытка оценить, в первом приближении, возможность получения высокочистых кварцевых концентратов из этих образований.

Конгломераты в пределах Гирвасской площади (рис. 1) имеют поверхность распространения до 2–3 км². Они формируют значительную часть ятулийской осадочной толщи мощностью 25–30 м, переслаиваясь с гравелитами, разнозернистыми песчаниками и алевролитами.

В конгломератах преобладают гальки кварца (рис. 2), на отдельных участках они составля-

ют до 90 % всего объема галечного материала. Кроме кварцевых галек, присутствуют гальки, сложенные силицитами, графитистыми сланцами, подстилающими базальтами. Конгломераты плотно упакованы, количество цемента варьирует в них от 10 до 20 %. Цемент конгломератов выполнен в разной степени рассланцованным кварцито-песчаником, выделяются участки с ожелезнением, местами цемент представлен хлорит-серицит-кремнистым материалом. Размер кварцевой гальки варьирует от единиц до первых десятков сантиметров, цвет – от полупрозрачного до серого, с преобладанием слабoproзрачных молочно-белых разностей. Иногда на поверхности обломков присутствуют участки, покрытые налетами гидрооксидов железа, количество которых составляет не более 0,3 об. %. Характерной особенностью крупной кварцевой гальки является наличие хлоритовой «рубашки» толщиной до 1–1,5 мм.

Для минералогическо-геохимических исследований была подготовлена коллекция гальки из конгломератов (13 проб), в которой представлены макроскопически различающиеся между собой по цвету, степени прозрачности и количеству минеральных включений основные разновидности кварцевых обломков размером от 1–3 до 20 см по длинной оси. Методом рентгеновской дифракции (дифрактометр Thermo Scientific ARL X'TRA) осуществлен контроль фазовой чистоты материала и получена количественная структурная характеристика кварца. Изучение микроэлементного состава галечных проб выполнено методом LA-ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES-2 (Thermo scientific) с приставкой лазерной абляции UP-266 Macro (New Wave research). Мето-

дическое описание LA-ICP-MS-анализа кварца приведено нами в работе [4]. Определение валового содержания элементов-примесей в кварцевых концентратах выполнено методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) в НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва). Изучение морфологии и состава минералов-

примесей в кварцевых гальках выполнено с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350. Эксперименты по обогащению двух технологических проб молочно-белого кварца из гальки проведены на базе комплекса лабораторного оборудования ИГ КарНЦ РАН.

Рис. 1. Схема геологического строения Койкарской структуры (Центральная Карелия) и области распространения ятулийских кварцевых конгломератов [2]. Условные обозначения: Ятулий: 1 – габбродолериты; 2 – карбонаты и алевролиты верхнего ятулия; 3 – базальты среднего ятулия; 4 – песчаники, гравелиты среднего ятулия; 5 – базальты нижнего ятулия; 6 – песчаники, гравелиты и конгломераты нижнего ятулия. Сумий+сариолий: 7 – полимиктовые конгломераты; 8 – андезибазальты. Лопий: 9 – вулканогенно-осадочные образования зеленокаменного пояса; 10 – гранитоиды; 11 – точки отбора проб кварцевых галек; 12 – автодорога Р15

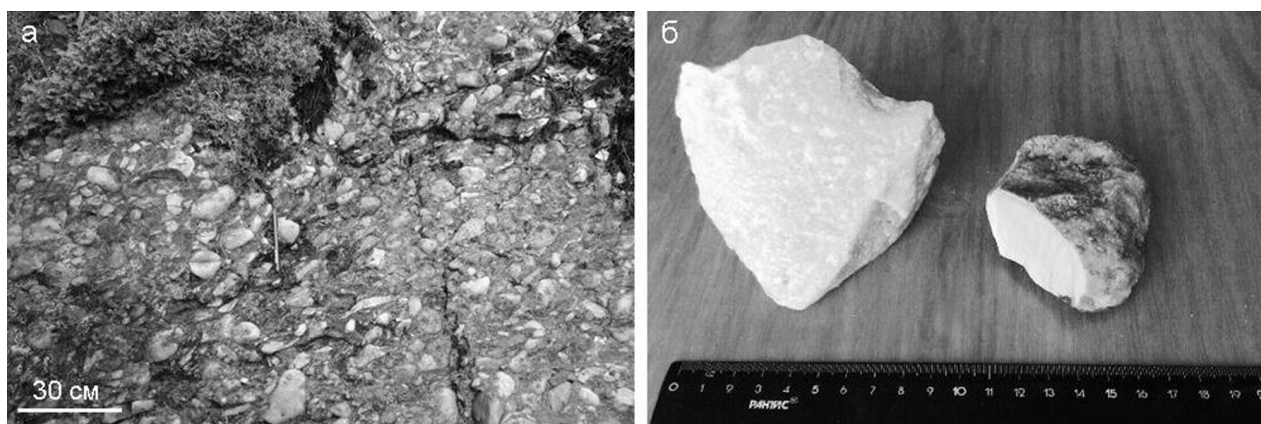
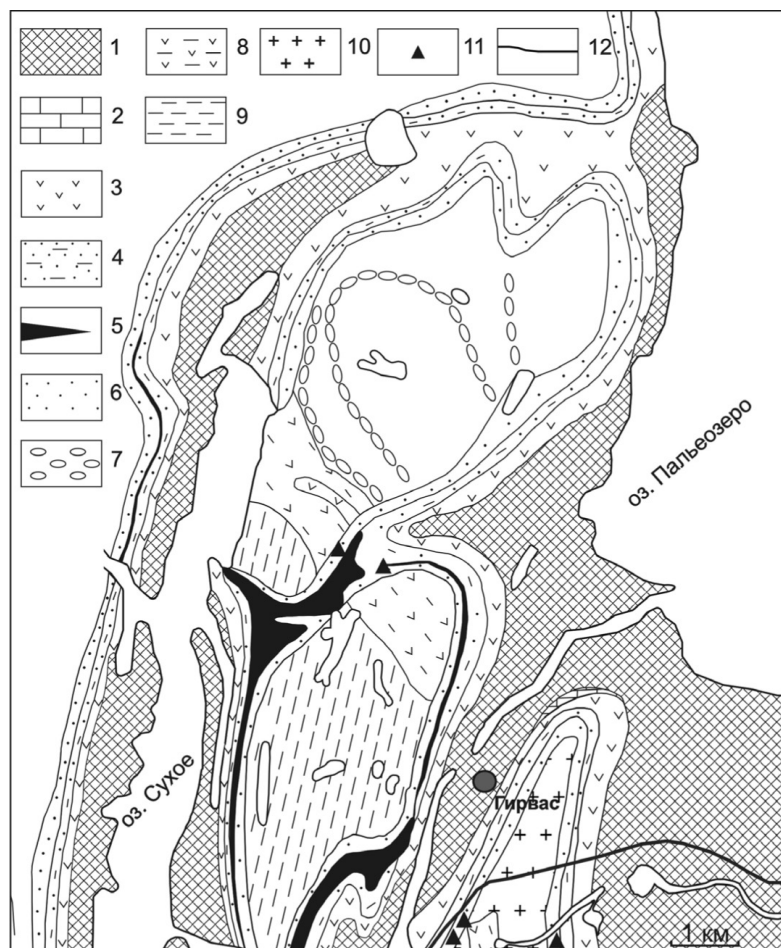


Рис. 2. Палеопротерозойские кварцевые конгломераты (р-н Гирвас, центральная Карелия): а – общий вид обнажения; б – галечный кварц

В ходе рентгенографического изучения галечного кварца были определены параметры элементарной ячейки кварца (a , c и V) и показатель совершенства кристаллического строения (СКС), отражающий упорядоченность распределения кремнекислородных тетраэдров и их групп. Рентгенограммы кварца записывались при температуре 25 С в интервале углов отражения $2\theta = 136\text{--}156$ с шагом $0,01^\circ$. Параметры элементарной ячейки a и c определены с точностью $\pm 0,0001 \text{ \AA}$, объем V – с точностью $\pm 0,01 \text{ \AA}^3$. Количественно степень СКС определялась величиной диффузности дифракционных отражений (234) на снимках порошковых рентгенограмм для различных образцов кварца относительно этого отражения для эталонного кварца [7]. В качестве эталона для измерения СКС использованы прозрачные кристаллы горного хрусталя Приполярного Урала. Результаты измерения параметров элементарных ячеек и степени СКС приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры элементарной ячейки и степень совершенства кристаллического строения (СКС) галечного кварца из конгломератов Гирвасской площади

№ п/п	№ пробы	СКС, %	a , \AA	c , \AA	V , \AA^3
1	G-1	50	4,9136	5,4050	113,01
2	G-3	50	4,9137	5,4053	113,02
3	G-4	60	4,9135	5,4053	113,01
4	G-6	61	4,9134	5,4049	113,00
5	G-7	65	4,9134	5,4050	113,01
6	G-8	65	4,9133	5,4050	113,00
7	G-10	56	4,9132	5,4048	112,99
8	G-11	51	4,9136	5,4052	113,02
9	G-12	63	4,9134	5,4050	113,00
10	G-13	51	4,9135	5,4052	113,01
11	G-14	54	4,9135	5,4050	113,01
12	G-15	63	4,9135	5,4051	113,01
13	G-17	55	4,9135	5,4051	113,01

Соотношение значений параметров ячеек a и c кварца из галек вынесены на диаграмму, где для сравнения показаны те же параметры для промышленного кварца гидротермальных жил (рис. 3). Видно, что значения параметров элементарных ячеек кварца из галек варьируют незначительно и укладываются в интервал параметров ячеек гидротермального кварца, что косвенно свидетельствует об относительной чистоте кристаллической решетки галечного кварца из

конгломератов. Однако для получения более достоверных сведений о структурной чистоте галечного кварца необходимо проведение спектроскопических исследований (ЭПР, ИКС). Показатель степени СКС галечного кварца варьирует от 50 до 65 %, что является хорошей характеристикой его структурной упорядоченности (табл. 1).

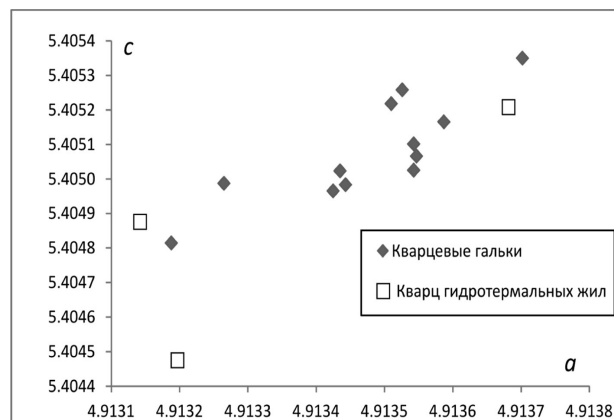


Рис. 3. Соотношение значений параметров a и c элементарной ячейки (\AA) в галечном кварце из конгломератов и промышленном кварце гидротермальных жил [3]

Результаты прецизионного LA-ICP-MS исследования, подробно изложенные в нашей предыдущей работе [4], показали, что галечный кварц содержит широкий набор примесных элементов, таких как: Li, Be, Sc, Ti, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ag, In, Sn, Sb, Ba, Lu, Hf, Ta, Au, Th, U, REE. Сравнительный анализ содержания и трендов распределения рассеянных элементов в галечном кварце с типовыми характеристиками для генетически разного кварца (магматического и постмагматического, терригенно-метаморфического, хемогенного и гидротермального) позволяет выделить в составе гальки конгломератов две кварцевые разновидности, соответствующие гидротермальному и терригенно-метаморфическому происхождению (рис. 4). Мы полагаем, что при формировании конгломератовой толщи поступление обломочного материала происходило из различных источников, основными из которых являются эродированные гидротермальные жилы и кварц из миндалекаменных андезитов палеопротерозойского вулканического комплекса. Полученные нами данные о содержании редких элементов в составе галечного кварца, сопоставимые с данными по кварцу гидротермальных жил, указывают на природную химическую чистоту самого кварца и, в случае удаления минеральных включений, предполагают возмож-

ность получения на основе гальки из конгломератов кварцевых концентратов хорошего качества.

С целью выявления присутствующих в галечном кварце минеральных и микроминеральных включений, влияющих на качество кварцевого концентрата, были проведены электронно-микроскопические и микрозондовые исследования кварца. Установлено, что все разновидности кварцевой гальки содержат минеральные включения, развитые как внутри зерен кварца, так и по залеченным микротрещинкам. Основной минеральной примесью является мусковит, содержащий до 5,5 % Fe (рис. 5).

Преимущественно он развит в виде относительно крупных лейст, размеры которых более 0,2 мм. Изредка с длинными лейстами мусковита соседствуют включения магнетита. К гнездовидным выделениям мусковита может быть приурочен хлорит. Иногда отмечаются очень мелкие, игловидные включения мусковита размером 0,03 мм и менее, а также включения альбита и микроклина. Включения кальцита, установленные внутри зерен кварца (0,01–0,05 мм), могут иметь как ограненную форму, так и размытые контуры (рис. 6). Состав некоторых примесных минералов приведен в таблице 2.

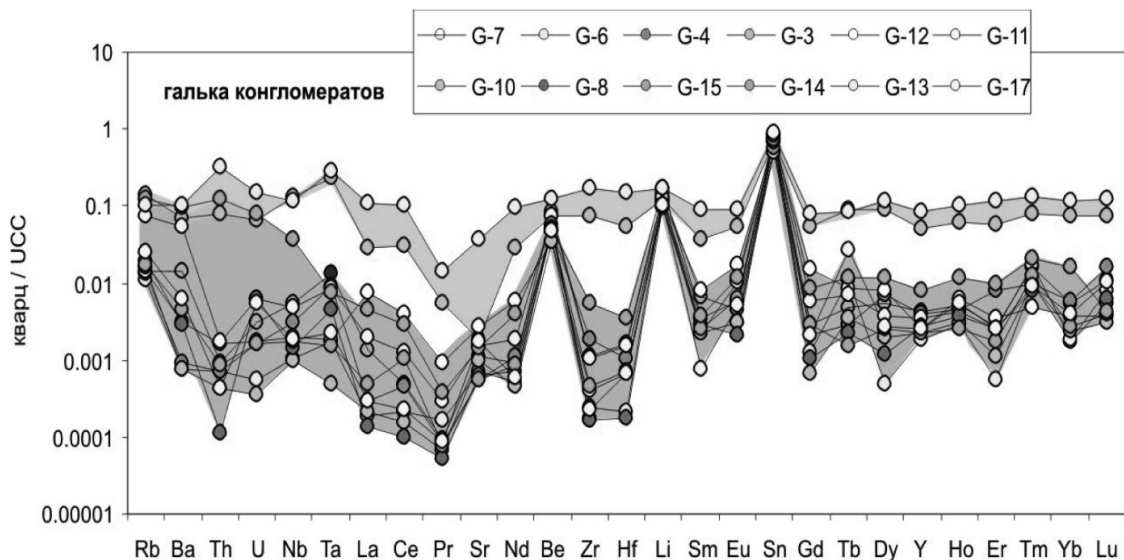


Рис. 4. Распределение рассеянных элементов-примесей в галечном кварце из конгломератов по данным LA-ICP-MS анализа (нормировано к верхней континентальной коре [9]).

Залитые области отражают две различные геохимические разновидности галечного кварца: нижняя область соответствует гидротермальному кварцу, верхняя – терригенно-метаморфическому

Минеральные включения микронных размеров (рис. 7), представленные мусковитом, цирконом, монацитом, рутилом, титанитом, апатитом, баритом, локализуются внутри зерен кварца, удаление которых в процессе очистки кварца традиционными методами сопряжено с определенными трудностями. Особенно это касается микровключений с неровными, заливатными границами срастаний (табл. 3), что подтверждается прямыми экспериментами по очистке галечного кварца.

Следует отметить, что на отдельных участках конгломератовой толщи в общей массе кварцевой гальки встречаются единичные обломки, в которых микроскопическими исследованиями устанавливается чрезвычайно большое количество крупных и мелких минеральных включений окислов железа, апатита, кальцита, амфибола, монаци-

та и др. Морфология и характер выделения минеральных примесей в данном кварце, наряду со сведениями о разнотипности геохимического состава кварца из галек, как отмечалось выше (рис. 4), допускают их терригенно-метаморфогенную или хемогенную природу, что может являться дополнительным аргументом в пользу существования нескольких терригенных источников сноса, формировавших осадочную конгломератовую толщу. Вопрос генезиса кварцевых конгломератов интересен и является предметом отдельных исследований. Однако наличие в общей массе гальки сильно минерализованного кварца, в случае использования его в качестве сырья для получения кварцевых концентратов, может крайне негативно сказаться на их качестве. Поэтому очень важной задачей, которую следует решить, является оценка количества такой загрязненной гальки,

как в пределах отдельных участков, так и в целом на рассматриваемой территории. Вместе с тем, подбором определенных технологий очистки,

следует определить и качество кварцевого продукта, получаемого на основе галечного кварца с большим содержанием примесных минералов.

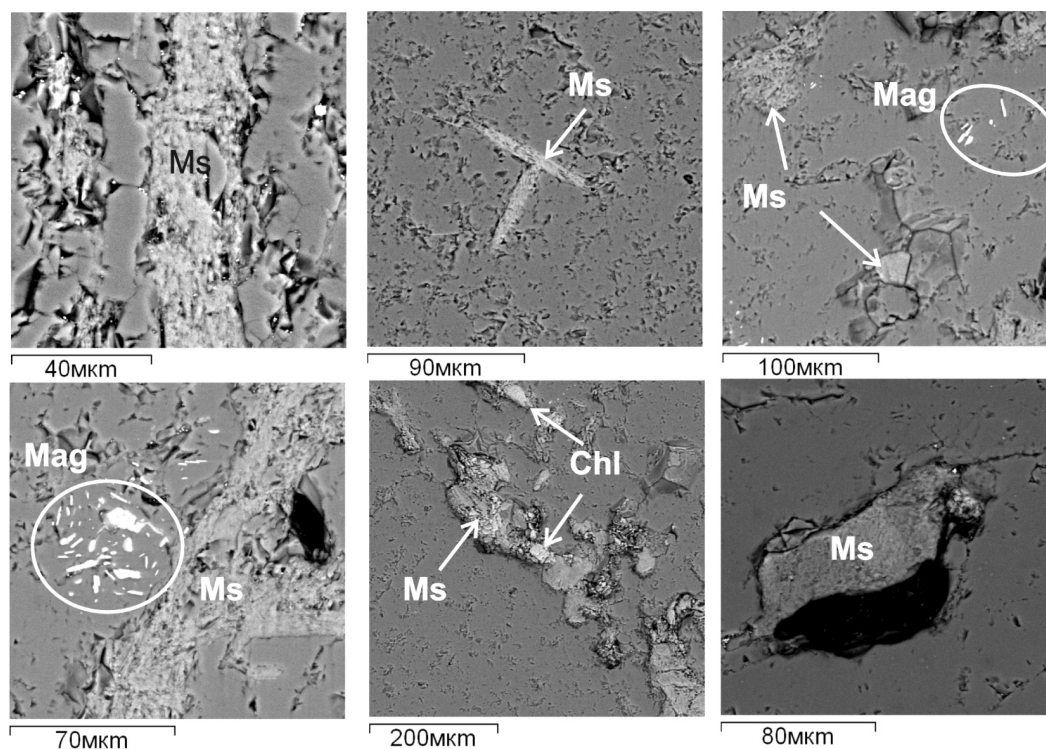


Рис. 5. Минеральные включения мусковита (Ms), хлорита (Chl) и магнетита (Mag) в галечном кварце из конгломератов

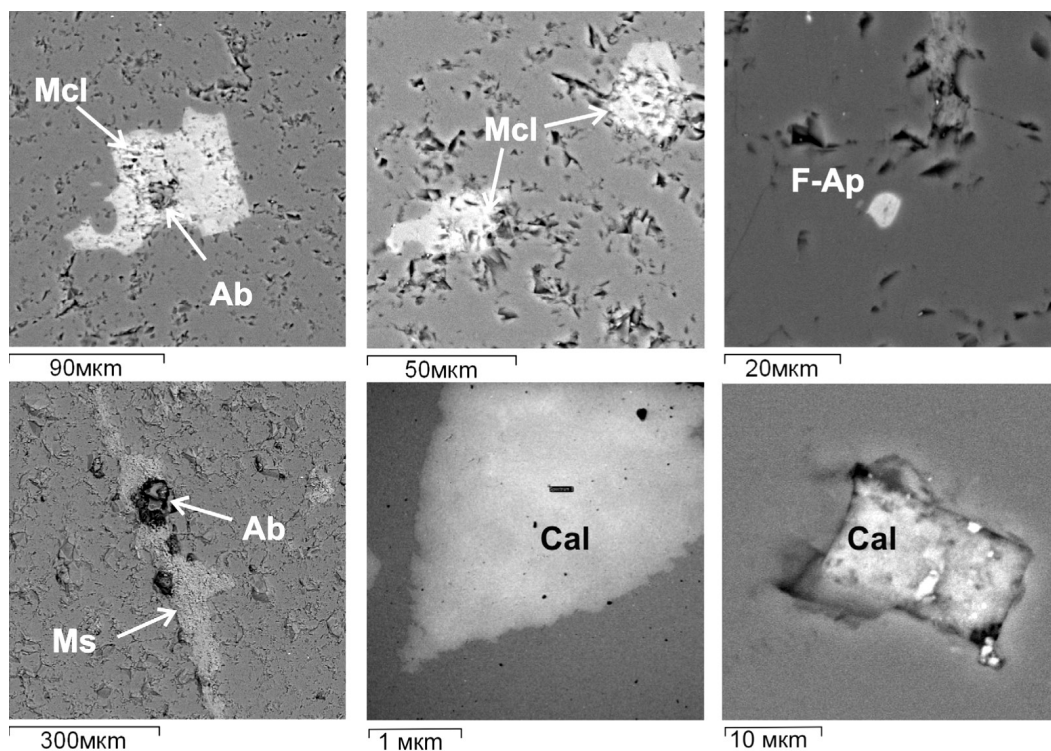


Рис. 6. Микроминеральные включения микроклина (Ms), альбита (Ab), фторапатита (F-Ap), мусковита (Ms) и кальцита (Cal) в галечном кварце из конгломератов

Таблица 2

**Состав минеральных включений в галечном кварце
по данным микрозондового анализа, вес. %**

Минерал	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	V ₂ O ₅	FeO+Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	P ₂ O ₅
Мусковит	0,64–0,88	25,5–32,0	43,6–50,9	9,7–10,7	0,09	2,03–5,46	0–0,12		
Титанит		2,48	19,5			2,3	45,9	14,97	0,89
Микроклин		12,1–17,9	65–78	10,2–17,1					
Кальцит						1,46		52	

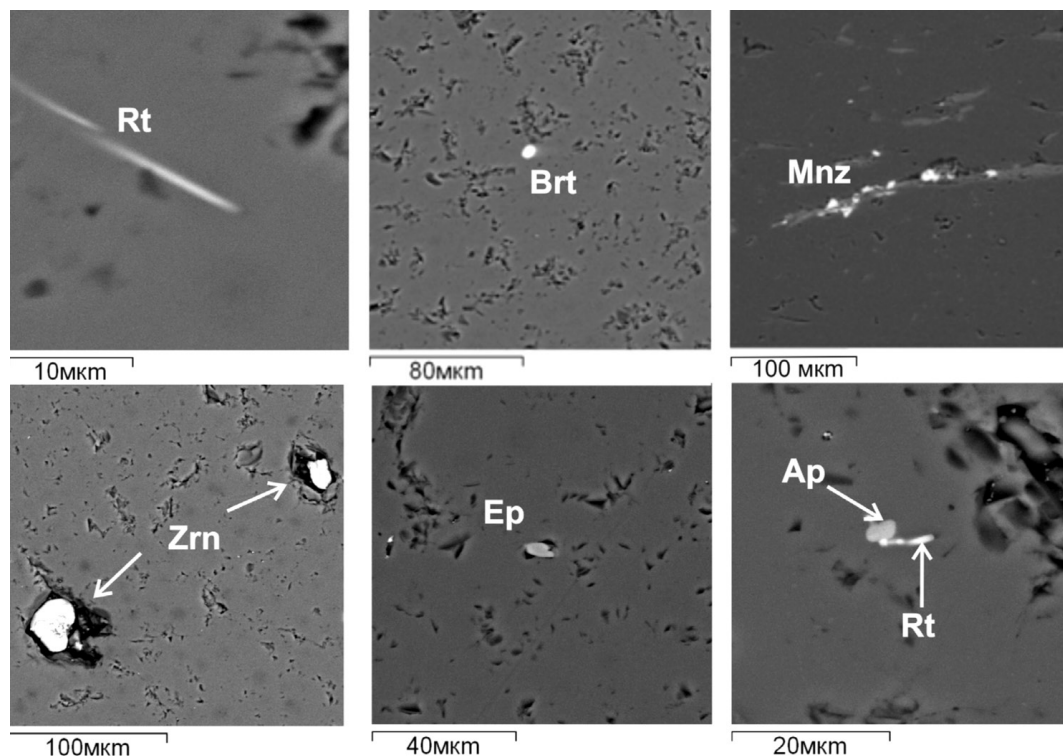


Рис. 7. Микроминеральные включения рутила (Rt), барита (Brt), монацита (Mnz), циркона (Zrn), эпидота (Ep), апатита (Ap) в галечном кварце из конгломератов

Таблица 3

Характеристика основных минеральных включений в галечном кварце

Минерал	Размер, мкм	Форма включений	Примечание
Кальцит	25×50 20×10	Линзовидная с ровными границами; ограниченная	В пределах включения неоднороден
Магнетит	200×70 3–5×10–20	Неправильная удлинённая, границы неровные, заливчатые	Отмечаются в скоплениях
Мусковит	200×30 8×1 и менее	Удлиненные пластинки и иголки с ровными границами	Ожелезненный
Циркон	20 и менее	Округлая	
Монацит	8–10 и менее	Округлая, с ровными границами	
Рутил	1×10	Игольчатые, округлые, заливчатые	
Микроклин	20–90×10–50	Неправильная, границы заливчатые	В пределах включения неоднороден
Альбит	10×10	Округлая, с ровными границами	
Барит	10×10	Округлая	
Апатит, фторапатит	5–10×4	Окатанные, с ровными границами	

Технологическое изучение обогатимости галечного кварца выполнено на материале двух проб (№ 1 и № 10), характеризующих молочно-белый кварц, визуально напоминающий жильный, отличающихся по составу и количеству минеральных примесей. Галечный кварц пробы № 1 по сравнению с пробой № 10 более загрязнен минеральными примесями: среди включений в нем доминирует мусковит, развитый по границам зерен в виде мелких чешуек и тонких пластинок. В процессе измельчения мусковит, развитый по

трещинам в виде пластинок хорошо раскрывается, так как границы срастаний четкие, ровные (рис. 8 а, б). Чешуйки, имеющие неровные, заливчатые и занозистые границы вскрываются не полностью. Трудноудаляемыми микроминеральными включениями являются: кальцит (10–20 мкм), магнетит (3–5 мкм), мусковит (<8 мкм), игольчатый рутил и апатит, находящиеся внутри зерен кварца (рис. 8в, г). В кварцевой пробе №10 преобладают полевые шпаты, кальцит и мелкий мусковит (рис. 8 д, е).

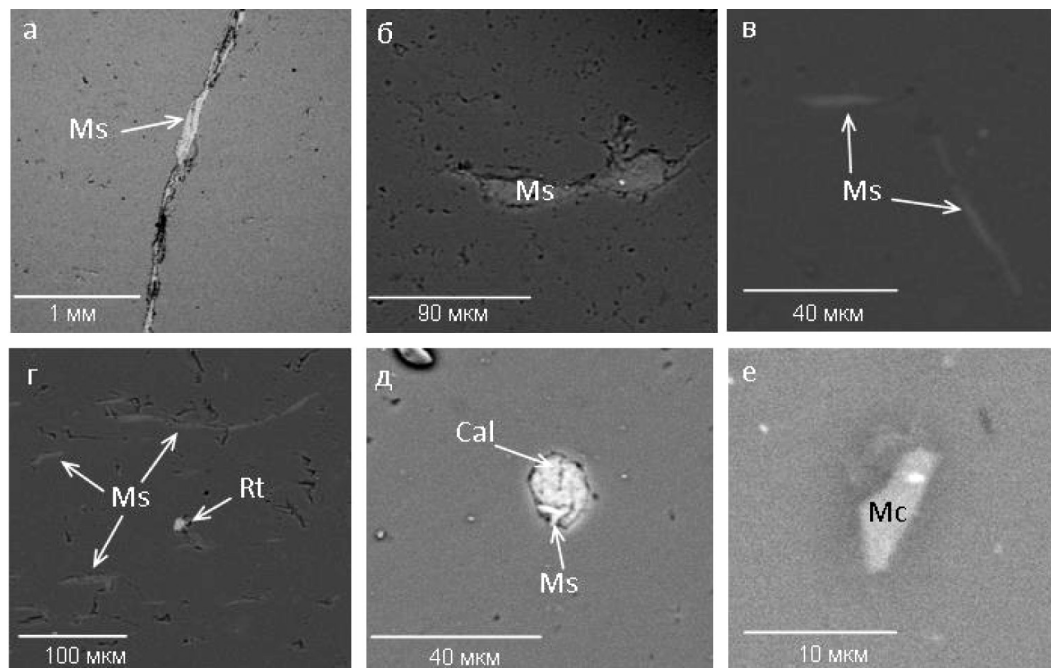


Рис. 8. Минеральные включения мусковита (Ms), рутила (Rt), микроклина (Mc) и кальцита (Cal) в галечном кварце технологических проб (№1: а–г, №10: д–е)

При глубоком обогащении кварцсодержащих пород сложного состава высокую чистоту кварца обеспечивает технология фирмы «Unimin» (США), включающая дробление в конусной дробилке, мокрое измельчение в стержневой мельнице до 0,3 мм (50 mesh) с последующей классификацией на 5 фракций. Классифицированный и обесшламленный по 0,071 мм материал подвергается многостадийной флотации, которая включает 1–3 операции отделения слюды, 1–3 флотации железосодержащих минералов сульфонатами, 1–5 флотаций полевого шпата, которые ведут с использованием аминов в среде, создаваемой плавиковой кислотой. Содержание полевого шпата в кварце после флотации снижается до 0,5 %. После сушки и магнитной сепарации получается кварц промежуточной чистоты так называемый. QUINTUS-кварц, содержащий не более 400 ppm

примесей. Для повышения качества кварца промежуточной чистоты дальнейшая очистка его (двойное выщелачивание в нагретой до 65°C 20 % плавиковой кислоте, и высокотемпературное хлорирование) проводится порционно на узко классифицированном мокрым методом материале: (50–60, 60–70, 70–100, 100–140, 140–200) mesh, что соответствует (0,3–0,25, 0,25–0,21, 0,21–0,15, 0,15–0,125, 0,125–0,071) мм. Предел очистки Jota кварца – 9,5 ppm примесей [1, 8].

Выбор наиболее рациональных методов обогащения кварца Карелии в каждом конкретном случае определяется микроструктурой самого кварца, размерами и формами вхождения примесей в кварц [5, 6]. Лабораторная схема обогащения гальки из конгломератов включает стадию рудоподготовки (дезинтеграция горной массы, сортировку с отделением гальки, дробление гальки,

классификацию по 1 мм, сухое измельчение в замкнутом цикле с классификацией до крупки размером 0,4–0,1 мм) и обогащение. Фракционный состав измельченных в одинаковом режиме проб (крупка фракции 0,4–0,1 мм) отличается по гранулометрии и форме зерен (табл. 4, 5). В обогащенной кварцевой крупке пробы № 1 зерна плоские, таблитчатые, в мелких фракциях преобладают полупрозрачные замутненные зерна изометричной формы. Среди примесей в кварце остаются мусковит, дифракционные отражения которого фиксируются на рентгенограммах (рис. 9), а также хлорит и единичные включениями темноцветных минералов. Минеральные включения микронных размеров (кальцит, мусковит, игольчатый рутил, апатит), устанавливаемые внутри кварцевых зерен при электронно-микроскопических

наблюдениях (рис. 8), в ходе очистки не высвобождаются. В обогащенной крупке пробы № 10 зерна кварца окатанные, преобладают прозрачные. Кварц визуально практически не содержит включений, присутствуют лишь единичные зерна с многочисленными точечными включениями темноцветных минералов. Посторонних фаз на рентгенограммах кварцевой крупки не выявлено (рис. 9).

Таблица 4

Гранулометрическая характеристика крупки, %

Номер пробы	Фракция, мм			
	0,4–0,315	0,315–0,25	0,25–0,16	0,16–0,1
№ 1	17,46	20,78	30,01	31,75
№ 10	25,76	28,49	20,40	25,35

Таблица 5

Характеристика крупки по форме зерен

Зерна	Содержание по пробам кварца, %			
	Проба № 1	Форма зерен	Проба № 10	Форма зерен
Прозрачные	38	плоские	71,5	окатанные
Полупрозрачные	26	плоские	14	частично окатанные
Белые (замутненные)	36	изометричные	14,5	изометричные

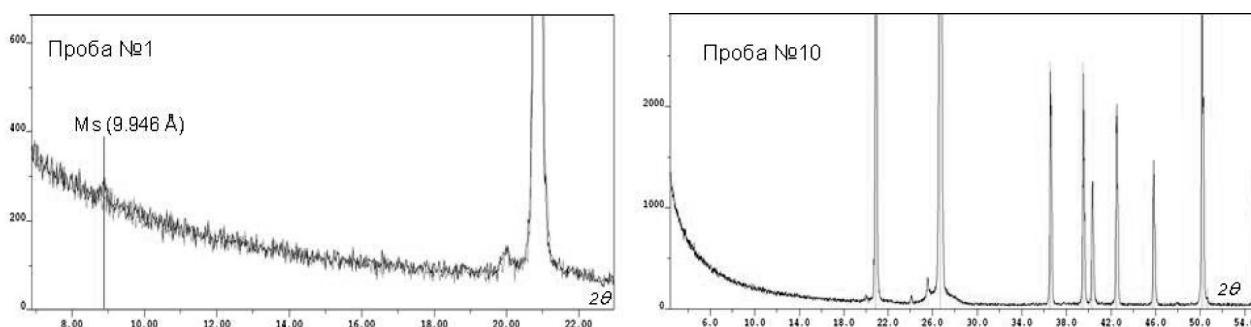


Рис. 9. Рентгенограммы технологических проб галечного кварца

Исходя из состава и размеров минералов-примесей, стадия обогащения галечного кварца включала магнитную сепарацию, поцикловую флотацию железосодержащих минералов, слюд и полевых шпатов, обработку в электрических полях высокой интенсивности и термохимическую обработку в соляной кислоте. Технологический выход продуктов по операциям очистки приведен в таблице 6.

Для оценки качества кварцевых концентратов определено содержание главных и постоянных элементов примесей, имеющих для промышленного использования кварца ключевое значение (табл. 7). Валовое содержание примесей в полученных концентратах по технологическим про-

бам № 1 и № 10 составило 730 и 323 ppm соответственно. Основными элементами-примесями в полученных кварцевых концентратах являются: калий (208 и 80 ppm), железо (57 и 36 ppm), кальций (16 и 28 ppm) и натрий (7,7 и 14 ppm), доминирует примесь алюминия – (415 и 140 ppm). Высокие концентрации этих элементов обусловлены, главным образом, невысвободившимися мельчайшими включениями слюды, полевых шпатов (альбита, микроклина), карбонатов и отчасти могут быть связаны со структурными примесями и газожидкими включениями в кварце. Деалюминирование кварца возможно при последующих обработках в растворе фтористоводородной кислоты, это потребует экспериментальной разработки

режимов и является предметом дальнейших технологических исследований. Однако, для определения предела обогатимости галечного квар-

ца следует дополнительно изучить структурные примеси в кварце, а также локализацию, размер, плотность и составы газово-жидких включений.

Таблица 6

Технологический выход продуктов в операциях очистки, % по массе

Операции очистки	Продукт	Проба № 1	Проба № 10
Классификация по 1мм	Отвальные хвосты	2,90	1,03
Обесшламливание	Шлам	7,50	6,95
	Крупка 0,4–0,1мм	89,60	92,02
Магнитная сепарация	Магнитная фракция	2,62	2,73
	Немагнитный продукт	86,98	89,29
Флотация темноцветных, слюды и полевого шпата	Слюдяной продукт	0,59	0,63
	Полевошпатовый продукт	4,19	4,36
	Кварц предварительной очистки	82,20	84,30
Очистка в соляной кислоте, отмывка	Вторичные шламы	1,85	1,28
	Потери за счет растворения примесей	0,35	0,27
Сушка	Кварцевый концентрат	80,00	82,75

Таблица 7

Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах из кварцевой гальки конгломератов, ppm

Проба	Fe	Ti	Zr	Mn	Al	Cu	Zn	B	Ni	Cr	Co	Ca	Sr	Ba	Mg	Na	K	Li	Ge	P	Σ
№1	57	6,9	0,61	0,51	415	0,32	0,05	0,9	0,14	0,12	0,05	16	0,13	3,0	12	7,7	208	0,05	1,2	0,1	730
№10	36	3,5	0,24	0,42	140	0,07	0,20	2,2	0,02	0,05	0,01	28	0,32	2,2	15	14	80	0,07	0,25	0,1	323

Примечание. Анализ выполнен методом ICP-AES.

К положительной химической характеристике полученных концентратов следует отнести низкие содержания в них лития (0,05 и 0,07 ppm), бора (0,9 и 2,2 ppm) и фосфора (0,1 ppm), лимитируемых при использовании кварцевого сырья для производства ферросилиция высоких марок.

Таким образом, проведенное минералогическое исследование гальки из конгломератов Гирвасской площади показало, что по структурным и геохимическим характеристикам основная часть галечного кварца близка к гидротермальному жильному кварцу и может рассматриваться как перспективное нетрадиционное кварцевое сырье. Незначительная часть гальки из конгломератов представлена кварцем с высоким содержанием минеральных примесей, который в процессе обогащения вызовет сложности и потребует специального подхода. Предварительными экспериментами по очистке галечного кварца установлено, что качество концентратов определяется, главным образом, количеством и размером включений мусковита и полевого шпата, что необ-

ходимо учитывать при дальнейшей отработке технологии обогащения. Низкие содержания Li, B и P позволяют рассматривать возможности использования данного типа кварца для производства ферросилиция высоких марок, если решить проблему извлечения гальки.

На следующем этапе изучения Гирвасских кварцевых конгломератов целесообразно выполнить более детальное опробование толщи для выявления областей распространения и количества галечного кварца с высокой степенью минерализации; оценить возможность извлечения кварцевой гальки из цемента и изучить его вещественный состав; определить содержание структурных примесей в кварце; оценить влияние кислотной очистки, в том числе и в HF, на чистоту кварцевого концентрата.

Работа выполнена в рамках проекта «Геологическая и минералогическая оценка кварцевого сырья Карело-Кольской кварценозной провинции – нового перспективного региона России» Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №27.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылова Г. И., Скобель Л. С., Митрофанов А. А., Балакирев В. Г. Геологические и минералогическо-геохимические сведения о кварце с торговой маркой ЮТА (США, штат Северная Каролина). Возможности поиска его аналогов в России // Уральский геологический журнал. 2003. № 4(34). С. 81–122; № 5(35). С. 193–195.
2. Рыбаков С. И., Голубев А. И., Слюсарев В. Д. и др. Металлогения Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 94 с.
3. Светова Е. Н., Инин И. С. Рентгеноструктурные особенности промышленных разновидностей кварца гидротермально-метаморфогенных жил Приполярного Урала // Сб. ст. по матер. докл. VI Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 102–105.
4. Светова Е. Н., Светов С. А., Степанова С. В., Парамонов А. С. Перспективы использования прецизионного метода LA-ICP-MS для решения проблемы типоморфизма кварца // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 14. Петрозаводск: КарНЦ, 2011. С. 184–189.
5. Скамницкая Л. С., Данилевская Л. А. Выбор методов обогащения кварца на основе закономерностей распределения и формы нахождения в нем примесей (на примере участков Меломайс и Фенькина-Лампи // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 83–94.
6. Щипцов В. В., Скамницкая Л. С. Минералогическо-технологические особенности кварцевого сырья Карелии // Обогащение руд, 2000. № 3. С. 23–31.
7. Юргенсон Г. А., Тимуров Г. Т. О совершенстве кристаллического строения жильного кварца // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1980, № 6. С. 50–59.
8. Jung L. High purity natural quartz. Quartz Technology, Inc., New Jersey. 1992. 550 p.
9. McLennan S. M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // Geochemistry, Geophysics, geosystems 2, 2001. Art. No. 2000GC000109.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ШУНГИТОВЫХ ПОРОШКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД

Ануфриева С. И., Сладкова Г. А.

ФГУП «ВИМС», г. Москва, vims@df.ru

В настоящее время техуглерод является главным наполнителем в резинотехнической промышленности. Однако уровень цен на природные минеральные наполнители значительно ниже цен на техуглерод. Это обстоятельство определяет целесообразность использования дешевых наполнителей для полной или частичной замены техуглерода. Введение наполнителей (твердых ингредиентов) для получения резин и полимерных композиционных материалов удешевляет конечную продукцию, улучшает физико-механические и эксплуатационные свойства.

Одним из перспективных наполнителей для резинотехнических изделий (конвейерные ленты, ремни, рукава, пластины) являются шунгитсодержащие породы Зажогинского месторождения, уникальные по составу, свойствам и структуре природные образования [1].

Для оценки возможности использования шунгитовых порошков (ШП) в качестве наполнителя в резинотехнической промышленности необхо-

димо учитывать связь между изменением химического и минерального составов исходного сырья в пределах одного месторождения и тонкодисперсными порошками, получаемыми в процессе измельчения исходного материала. Использование механического измельчения дает возможность заменить наполнители на основе техуглерода более дешевым углеродсодержащим материалом – шунгитовой породой. Минеральный состав исходной руды, ее текстурно-структурные особенности оказывают решающее влияние на эффективность процесса измельчения.

Изменяя способы измельчения шунгитовой породы, а также подбирая способы классификации полученного в результате измельчения материала, можно регулировать размеры частиц порошка в соответствии с техническими условиями к наполнителям в шинной промышленности. Одним из ведущих факторов, влияющих на степень структурной изменчивости минералов, является способ разрушения, определяемый типом измельчителя.

От типа и конструкции измельчителя зависит характеристика процесса активации. Технология получения шунгитовых наполнителей определяется комплексом физико-механических свойств шунгитовой породы, ее измельчаемостью, а также требованиями к дисперсности готового продукта и производительности оборудования.

Целью данной работы являлась оценка физико-химических показателей ШП, полученных различными способами измельчения из шунгитовой породы для их использования в резинотехнической промышленности.

Для решения поставленной задачи исследованы зависимость гранулометрического состава и формы частиц ШП от способа измельчения исходного материала и классификации измельчения. Фракция крупностью –0,3 мм являлась исходным материалом для получения тонких дисперсных ШП.

В лабораторных условиях измельчение материала проводилось на виброистирателе ИВ-3, а в полупромышленных условиях – на универсальном акустическо-вихревом измельчителе «Торнадо».

Известно [2], что фракционирование материала по крупности на просеивающих поверхностях в промышленности применяется для продуктов с тониной помола не ниже 40 мкм. Оно сопряжено с малой производительностью, низким КПД, быстрым износом и «забиваемостью» сеток. «Мокрый» способ фракционирования сыпучих материалов крупностью <40 мкм малопроизводителен, сложен и дорог, а в ряде случаев и вовсе не может быть применен.

Таким образом, предпочтительным является применение аэродинамического способа классификации, наиболее эффективного способа выделения тонких и сверхтонких фракций в готовую продукцию как на стадиях переработки исходного сырья, так и в процессах получения товарных продуктов из технологического продукта крупностью –0,3 мм.

Классификация производилась на лабораторных аэродинамических классификаторах (сепараторах) различного вида, основанных на сухом методе классификации порошковых материалов.

Первый тип относился к центробежным циркуляционным классификаторам. Разделение материала происходит во вращающемся потоке газа (воздуха) под воздействием на частицы центробежной и аэродинамической сил. Основной рабочей частью сепаратора является неподвижная цилиндрическая камера с тангенциальными каналами и перегородками.

Разделение сыпучего материала по крупности на сепараторах 2 типа осуществляется в вертикальном потоке воздуха со ступенчато-изменяющейся скоростью потока.

Для изучения гранулометрического состава и морфологии зерен применялся оптико-геометрический метод. Ситовой анализ классов выполнен на приборе Frisch Particle Sizer Analysette-22 (табл. 1).

Таблица 1
Ситовая характеристика классов

Тип измельчителя	Заданная конечная крупность, мкм	Класс, мкм	Выход, %
Виброистиратель	–50	<2	9,31
		<5	28,63
		<8	38,09
		<20	51,47
		<50	63,18
		<80	78,12
		<200	100,0
Мельница «Торнадо»	–10	<2	22,64
		<5	66,34
		<8	87,47
		<20	99,87
		<50	100,0

При использовании виброистирателя ИВ-3 заданная конечная крупность измельчения составляла –50 мкм. Время истирания –20 мин.

При измельчении на струйной мельнице «Торнадо» заданная крупность составляла –10 мкм. Данные табл. 1 показывают, что при использовании мельницы – несколько больший выход тонких фракций <8 мкм.

Данные после измельчения на мельнице «Торнадо» указывают на то, что распределение частиц внутри мелкой фракции соответствует стандартному статистическому разделению Гаусса. Дифференциальная кривая распределения частиц (тип Гаусса) указывает на присутствие различных фракций при максимальном количестве частиц (5 мкм). Следует отметить, что на виброистирателе не наблюдается строгого распределения частиц по типу Гаусса, пик в области 50–100 мкм принадлежит наибольшему проценту агломерируемых частиц.

Лабораторные испытания аэродинамического способа классификации исходных продуктов показали высокую эффективность получения товарных продуктов заданных классов крупности.

Результаты оптико-геометрического анализа показывают, что этот способ классификации позволяет не только получить товарный продукт более высокого качества, очищенный от мелкого класса, но и осуществлять более тонкое разделение класса крупностью <40 мкм, а также соз-

дать способ контроля качества по крупности получаемой продукции. Проведенные лабораторные испытания различных конструкций воздушных классификаторов (сепараторов) показали, что полученные порошки тонкого и сверхтонкого помола < 40 мкм и < 20 мкм, соответственно имеют окатанную и полуокатанную форму и обладают слабой тенденцией к агломерации. Несколько лучшие характеристики по этим показателям имеет сепаратор конструкции «АСПИД». Выполненные лабораторные исследования формы частиц ШП

показали, что формы и размер получаемых в результате помола шунгитовых частиц определяются способами их обработки.

Проведены исследования химического, минерального и гранулометрических составов ШП, полученных при разных способах измельчения. Способы получения тонкодисперсных порошков приведены в табл. 2. Оптимальными для промышленного опробования являются ШП, полученные после измельчения на роторной мельнице с максимальным выходом класса крупности –20+5 мкм.

Таблица 2
Способы получения тонкодисперсных порошков

№	Тип шунгитовых порошков	Способ измельчения и классификации	Заданные классы крупности, мкм
1	ШН-12	Струйная мельница и воздушная сепарация (струйный непрерывный режим)	<12
2	ШН-4	Виброизмельчение после шаровой мельницы (вибромельница)	<20
3	ШН-2	Воздушная сепарация после шаровой мельницы (сепарация), мелкий помол	–20
4	ШН-16	Роторное измельчение и сепарация (роторно-вихревой режим)	–20+5
5	ШН-17	Роторное измельчение и сепарация (после улавливания в рукавных фильтрах)	–5

Для оценки качества ШП использованы следующие методы: исследования физических и физико-химических свойств, дающие объективные характеристики структурных и химических особенностей шунгитового материала.

Химический состав шунгитовых наполнителей приведен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав шунгитовых наполнителей

Компонент, элемент	Содержание, %				
	ШН-12	ШН-4	ШН-2	ШН-16	ШН-17
SiO ₂	50,97	52,64	28,69	55,59	38,09
Al ₂ O ₃	5,44	4,59	9,65	4,44	4,52
MgO	1,00	0,62	0,88	0,79	0,98
CaO	0,62	0,57	1,59	1,79	1,00
Fe ₂ O ₃	2,47	2,13	4,81	2,47	3,68
MnO	0,01	0,01	0,21	0,01	0,05
S _{общ}	0,56	0,48	1,73	0,56	0,78
C	27,70	29,90	24,6	27,70	40,50
ППП	31,10	34,45	31,20	31,10	49,20

Минеральный состав шунгитовых наполнителей определен рентгенодифрактометрическим количественным фазовым анализом (РКФА) с применением внутреннего стандарта (табл. 4).

Таблица 4

Минеральный состав шунгитовых материалов по данным РКФА

Минерал	Содержание минералов, %		
	Ш-0,3	ШН-16	ШН-17
Кварц	51,0	53,0	37,0
Слюда (сидерит)	8,0	12,0	10,0
КПШ	3,0	2,9	3,1
Плагиоклаз	4,3	3,8	4,3
Кальцит	1,0	2,4	1,5
Доломит	нет	0,7	~1,0
Сидерит	<0,5	0,7	нет
Хлорит	0,7	0,9	1,1
Монтмориллонит	нет	нет	возможен
Гипс	возможен	3,3	3,8
Пирит	1,0	1,5	~1,0
Амфибол	<0,5	<0,5	нет
Анаказ	нет	нет	возможен
Р/а фаза(шунгит)	30,0	~18,0	35–37
Сумма	100	99,7	97,8–99,8
*β°(град)	9,2	6,0	4,5

*β°(град)-полуширина отражения шунгита с d_{max} ~ 3.4 Å°, выраженная в градусах

Установлено, что при доминирующей роли кварца в образцах ШН-16 и ШН-17 присутствуют карбонатные и глинистые минералы, в них практически в 2 раза увеличивается содержание слюдяного минерала. Особый интерес представляет образец ШН-17, характеризующийся практически одинаковым содержанием кварца и шунгитового вещества (~40 %), причем шунгитовое вещество имеет наиболее высокую степень упорядоченности структуры по сравнению с шунгитовым веществом других образцов, о чем свидетельствует полуширина отражения (β), равная $4,5^\circ$.

Гранулометрический состав и форма зерен образцов изучались оптико-геометрическим методом.

Частицы ШП исследованных образцов характеризуются окатанной и полуокатанной формой. Как правило, в них отмечается явная тенденция к агрегации. Максимальное агрегирование ШП отмечается в ШН-17, в котором отмечаются четкие губчатые и сотовидные структуры (иммерсионный препарат).

Изучение микростроения шунгитового материала порошков ШН-16 и ШН-17 проводилось методом электронной микроскопии В. Т. Дубинчуком. Установлено, что в образце ШН-17 вещество представлено почковидными и гроздевидными агрегатами, имеющими коллоидное микростроение (рис. 1).



Рис. 1. Почковидные выделения шунгитового вещества коллоидного микростроения.
Увелич. – 126

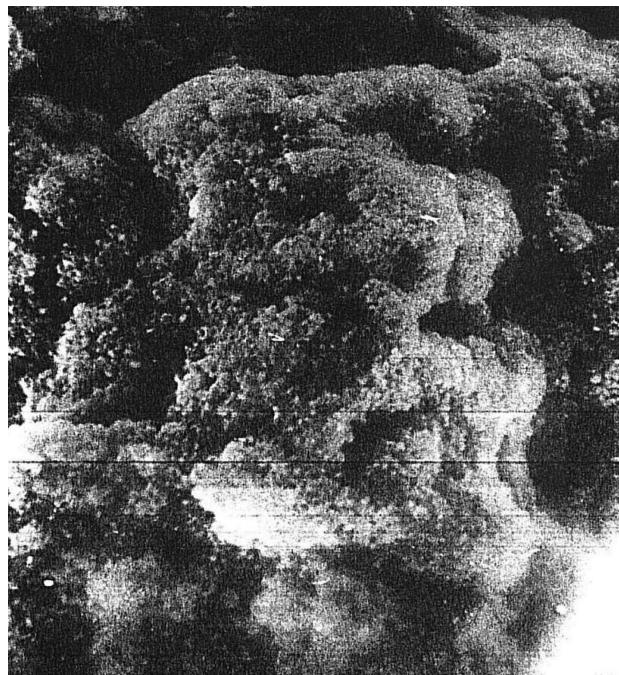


Рис. 2. Высокопористое почковидное выделение шунгитового вещества коллоидного микростроения. Увелич. – 1390

Такие выделения размером доли мм характеризуются высокой пористостью. На рис. 2 видно, что размер пор варьирует от долей до десятков микрон. Следует отметить, что агрегаты шунгитового вещества, наряду с крупными порами, имеют многочисленные мелкие поры различной формы: округлой, квадратной, звездо- и цепочковидной (рис. 3).



Рис. 3. Морфология пор в шунгитовом агрегате.
Увелич. – 4000

В образце ШН-16 основная масса шунгитового вещества представлена плотными агрегатами, имеющими концентрически-зональное и кольцевое микростроение. Установлено, что образования концентрически-зональной микроструктуры сложены преимущественно полуокатанными шунгитовыми частицами разного размера. Обычно центральная часть выполнена более тонким материалом (размер частиц 0,2–10 мкм) в отличие от периферии, сложенной частицами, размер которых изменяется от 1 мкм до 20 мкм (рис. 4).



Рис. 4. Фрагмент агрегата шунгитового вещества концентрически – зонального микростроения.
Увелич. – 2100

Агрегаты шунгитового вещества кольцевого микростроения (рис. 5) сложены плотно прилегающими полуокатанными частицами различного размера. Центральная часть таких образований может быть полой, либо содержать шунгитовый или терригенный материал (рис 6). Следует отметить, что терригенные минералы в основном не агрегируются. Однако на поверхности зерен кварца нередко наблюдаются «прилипшие» к ним частицы шунгитового вещества (рис. 7).

Распределение размера частиц в пробах определено на лазерном дифракционном микроанализаторе Analysette-22 Compact (табл. 4).

Для образцов ШН-16 и ШН-17 при необходимости перед использованием следует рекомендовать предварительную ультразвуковую обра-

ботку для уменьшения степени агрегирования частиц. В образце ШН-17 присутствуют агрегаты, состоящие из частиц размером более 10 мкм. После ультразвуковой обработки максимальный размер частиц составляет 2–3 мкм.

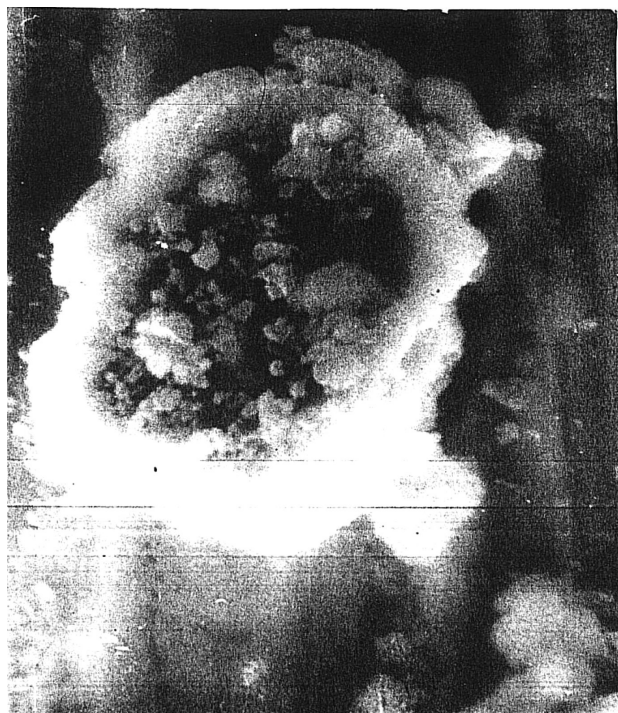


Рис. 5. Шунгитовый агрегат кольцевой микроструктуры.
Увелич. – 4300

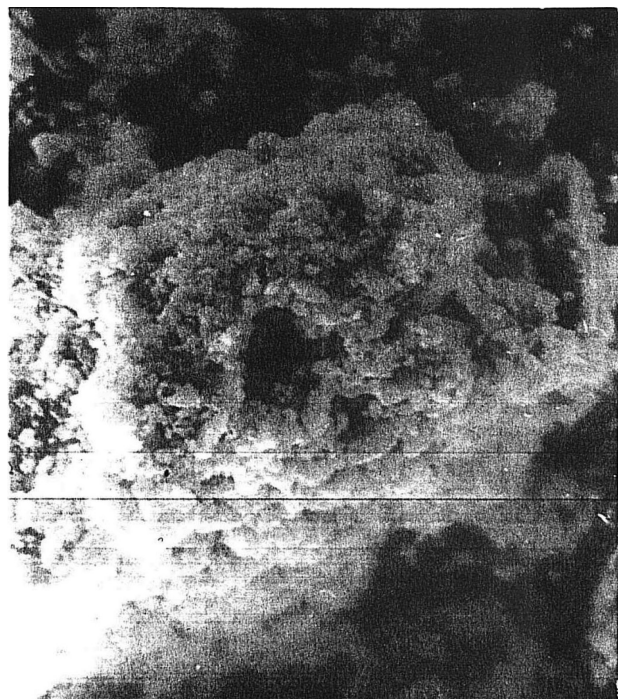


Рис. 6. Шунгитовый агрегат кольцевого микростроения.
Увелич. – 1510



Рис. 7. Кварц с прилипшими частицами шунгитового вещества. Увели. – 2600

Шунгитовые наполнители в зависимости от способа измельчения имеют различные размеры частиц, фракционный состав и значения удельной поверхности. Удельную поверхность шунгитовых наполнителей определяли стандартным методом низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ) [3]. Удельная поверхность вычисляется по соотношению величин площадей пиков десорбции аргона для шунгитовых наполнителей и эталона ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$). Величина удельной поверхности шунгитовых наполнителей ШН-16 и ШН-17 – 17,5 и 42,5 м², соответственно. Образец ШН-16 характеризуется невысоким значением

удельной поверхности. Образец ШН-17 отличается от образца ШН-16, в первую очередь, большим (на 13 %) содержанием углерода, меньшим размером частиц и в 2,5 раза большей площадью поверхности. Предварительная оценка технологических свойств шунгитовых наполнителей для их использования в резинотехнических изделиях возможна по некоторым показателям, приведенным в табл. 5. Как известно, косвенным методом оценки структурных характеристик наполнителя является его способность к поглощению масла [4]. Значения «масляного числа» приведены в табл. 5.

Результаты испытаний физико-химических показателей шунгитовых порошков представлены в табл. 6.

Основными требованиями, предъявляемыми к физико-химическим свойствам шунгитовых наполнителей, являются концентрация водородных ионов водной вытяжки рН 6–8 и «масляное число» 30–40 мл/100г. Средний размер частиц должен составлять 5–20 мкм с отсутствием частиц крупных фракций.

Таблица 4

Распределение частиц шунгитовых порошков

Тип ШН	Содержание частиц шунгитового порошка, %		
	Частицы с размером >20 мкм	Частицы с размером 5–20 мкм	Частицы с размером <5 мкм
ШН-12	3,8	43,3	52,9
ШН-2	3,8	56,2	40,0
ШН-4	11,0	46,0	43,0
ШН-16	27,0	59,0	14,0
ШН-17	38,0	54,0	6,0

Таблица 5

Основные структурные характеристики шунгитовых наполнителей

Тип ШН	Удельная поверхность, м ² /г	Масляное число мл/100г	Содержание частиц шунгитового порошка, %		
			>20 мкм	5–20 мкм	<5 мкм
ШН-12	17,0	36,0	3,8	43,3	52,9
ШН-2	12,0	36,0	3,8	56,2	40,0
ШН-4	22,0	32,0	11,0	46,0	43,0
ШН-16	17,5	32,0	27,0	59,0	14,0
ШН-17	42,5	38,0	38,0	54,0	6,0

Анализ данных, полученных при изучении физико-химических характеристик порошков, показывает, что изменяя способы измельчения, возможно получение наполнителей с разными свойствами. В зависимости от требований заказчика опробованные способы измельчения позво-

ляют получать материал необходимой крупности. Проведенные исследования морфологии частиц ШП показали, что форма и размер получаемых в результате помола шунгитовых частиц также определяются способами измельчения и классификации.

Таблица 6

Результаты испытаний физико-химических показателей шунгитовых порошков

№	Показатель	Размерность	Значения показателя					Шифр методики
			ШН-12	ШН-4	ШН-2	ШН-16	ШН-17	
1	Массовая доля потерь при 105°C	%	1,14	0,98	2,31	1,25	2,05	ГОСТ 25699.7–90
2	Зольность	%	69,08	65,55	68,80	68,90	50,80	ГОСТ 25699.8–90
3	Массовая доля водорастворимых солей	%	2,42	0,92	4,25	1,75	2,1	ГОСТ 19609.9–89
4	Йодное число	мг/г	36,2	39,4	25,4	32,4	68,5	ГОСТ 25699.3–90
5	Концентрация водородных ионов водной вытяжки	pH	5,8	5,00	5,45	7,85	7,71	ГОСТ 18307–78
6	Массовая доля остатка после просева через сито с сеткой 014 045	%	0,004 *)	0,001 *)	отс. *)	0,0042 0,018	отс. отс.	ГОСТ 25699.10–90
7	Абсорбция дибутилфталата	см³/ 100г	36	32	36	32	38	ГОСТ 25699.5–90

*)не определяли

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что аэродинамический способ классификации дробленного до крупности –2,5 мм шунгита является наиболее целесообразным, т. к. он позволяет достаточно эффективно выделить микронные фракции заданной крупности при обеспечении чистоты воздуха в зоне обслуживания и экологическую безопасность окружающей среды; что наилучшим способом технологической подготовки шунгитовых

наполнителей является измельчение на роторной мельнице (образец ШН-16). Этот метод можно рекомендовать как главный для получения шунгитовых наполнителей и их использования в резинотехнических изделиях; разработана гибкая технологическая схема дробления, измельчения и классификации шунгита, позволяющая управлять выходом материала различной крупности в зависимости от товарной потребности каждого класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шунгиты Карелии и пути их комплексного использования // Под ред. В. А. Соколова. Петрозаводск, Карелия, 1975, 240 с.
2. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368 с.
3. Минеральные наполнители резиновых смесей (Серия «Производство РТИ и АТИ») ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, М., 1984, С. 49.
4. Ruber compounding ingredients – Carbon black Determination of specific surface area by nitrogen adsorption methods. ISO4652–1:1994 (E).

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ ПОРОД СВЕТЛООЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК СЫРЬЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Попова Т. В., Климовская Е. Е., Ильина В. П., Фролов П. В.

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, tropova@krc.karelia.ru

Комплексная переработка минерального сырья важна для всей горнодобывающей промышленности. К комплексным объектам можно отнести Светлоозерское месторождение медно-никелевых

и карбонат-талковых руд, локализованное в пределах Западно-Светлоозерского массива ультрамафитов, которое находится в Медвежьегорском районе Республики Карелия. Светлоозерская

субвулканическая интрузия, площадью около 9 км², располагается в южной части Каменноозерской зеленокаменной структуры в зоне пересечения Каменноозерского и Кумбуксинского глубинных разломов. Интрузия представляет собой силл, внедрившийся в центральную часть постройки коматитового вулканизма [10], и включает в себя два массива – Западно-Светлоозерский и Восточно-Светлоозерский, разделенные северо-восточным разломом и клином вмещающих пород. В южной части установлено смещение по субширотному разлому с зоной брекчирования и оталькования серпентинизированных перидотитов [4].

Восточно-Светлоозерский массив сложен, в основном, аподунитовыми серпентинитами

и перспективен на хризотил-асбестовое оруденение. Западно-Светлоозерский массив сложен аподунитовыми, апооливинитовыми и апоперидотитовыми серпентинитами, специализирован на медно-никелевые и тальковые руды, а составляющие его породы наиболее сильно изменены метаморфическими и метасоматическими процессами.

В плане Западно-Светлоозерский массив имеет форму овала размерами 2,5×1,5 км, вытянутого по длинной оси в меридиональном направлении (рис. 1). Массив изучен по данным бурения до глубины 150–300м, отдельные скважины вскрыли контакты ультрамафитов с вмещающими породами на глубине 500–600м.

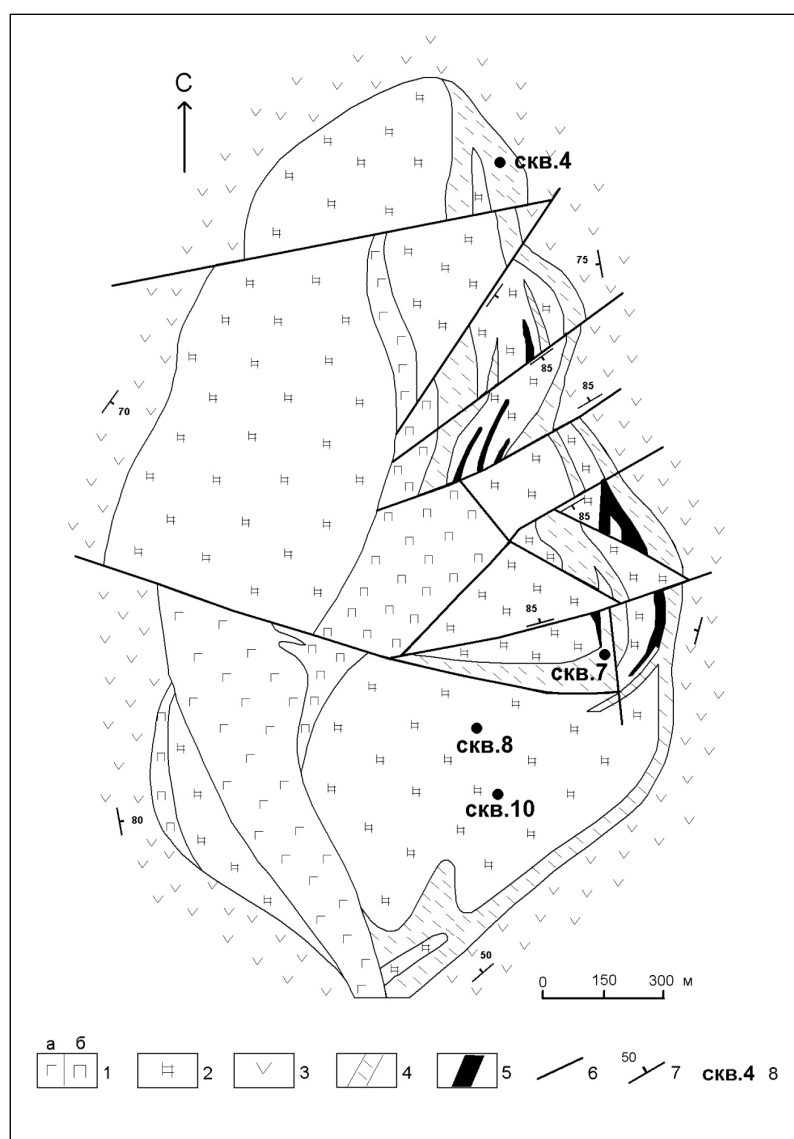


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Западно-Светлоозерского массива по [12]. Условные обозначения: 1–дайки габбро (а) и пироксенитов (б); 2–серпентиниты; 3–возминская серия, кумбуксинская свита: метабаза, метатифы, и метатифиты основного и средне-кислого состава; 4–залежи тальковых руд, 5–залежи медно-никелевых руд; 6–разломы, 7–элементы залегания; 8–скважины

Одной из главных особенностей массива является наличие в его центральной части крупных даек габбро и пироксенитов, использовавших

преимущественно главный магмовыводящий канал [12]. Западно-Светлоозерский массив разбит на блоки наиболее молодыми северо-восточными

разломами и прорван крупными жилами риодацитов, андезитов и долеритов. Центральная часть массива представлена антигоритовыми серпентинитами, лизардит и хризотил сохраняются в виде реликтов. В зоне субширотного разлома и в краевых частях массива антигоритовые серпентиниты рассланцованы, вплоть до исчезновения первичных текстурных признаков пород и преобразованы в тальковые руды. В пределах массива выделены три залежи тальковых руд, составляющие Светлоозерское месторождение: Южная, Восточная и Центральная. Внутреннее строение залежей осложнено наличием реликтовых тел серпентинитов мощностью от первых метров до 50 м. Центральная залежь отличается более простым строением, повышенной мощностью, высоким качеством руд, в них содержится меньше вредных примесей. По минеральному составу выделяется четыре типа тальковых руд: карбонат-тальковые крупнозернистые, карбонат-тальковые мелкозернистые, хлорит-(серпентин)-карбонат-тальковые разнозернистые, карбонат-хлорит-тальковые мелкозернистые [12].

Суммарные запасы и ресурсы тальковых руд Светлоозера составляют 23 млн. т. [12], т. е. относятся по классификации И. Ф. Романовича [7] к группе уникальных. Из физико-технических свойств тальковых руд изучались показатель белизны и плотность. Показатель белизны руд Центральной залежи колеблется от 59,5 % до 78,5 %, в среднем составляя 68,8 % (показатель белизны финского эталонного образца магнезит-тальковой руды – 75,1 % – по данным АО «Оутोकумпу», 1995 г.) [12].

Технологические испытания Светлоозерских тальковых руд в институте ВНИИнеруд (г. Тольятти, 1989г.) показали возможность получения концентрата микроталька с белизной до 86 %, а анализ физико-механических свойств Светлоозерского талька, проведенный в 1989г. в ЦНИИбумага, говорит в пользу соответствия сортам этой продукции на мировом рынке. По технологической схеме, разработанной для Светлоозерских тальковых руд (флотационно-магнитное обогащение и микронизация), может быть получен высококачественный микротальк, используемый в производстве резинотехнических изделий и пластмасс, в керамической промышленности.

В целом, использование Светлоозерских талькодержащих пород (включая тальковые руды всех типов) возможно в тех же направлениях, где апроби-

ровано применение талькового камня известных карельских и финских месторождений.

Светлоозерское месторождение медно-никелевых руд локализовано в восточной части массива и представлено залежью линзовидной формы с раздувами и пережимами, протяженностью по простиранию более 1200 м. Залежь сложена вкрапленными, густовкрапленными и прожилково-вкрапленными рудами с содержанием никеля от 0,2 до 0,5 %, среди которых отмечаются богатые сульфидные жилы и прожилки мощностью от первых сантиметров до 1 м и содержанием никеля до 11,6 %. По составу рудовмещающих пород выделяются руды в серпентинитах и руды в тальк-карбонатных породах. Массивные руды в серпентинитах имеют преимущественно халькопирит-пентландит (виоларит)-пирротиновый состав, вкрапленные руды – хромит-магнетит-сульфидный состав. Сульфиды представлены пирротинном, пентландитом, пиритом (марказитом), виоларитом, халькопиритом. Руды в тальк-карбонатных породах как массивные, так и вкрапленные, имеют пирротин-пентландит-халькопирит-пиритовый состав [6].

Разведанные (по категории C_1) и предварительно оцененные (по категории C_2) запасы полезных компонентов при различных вариантах подсчета составляют [11]:

- никеля от 15,6 тыс. т до 33,9 тыс. т при средних содержаниях его в руде 1,65 % и 0,77 % соответственно;
- меди от 1,9 тыс. т до 4,8 тыс. т при средних содержаниях в руде 0,20 % и 0,11 % соответственно;
- кобальта от 0,6 тыс. т до 1,3 тыс. т при средних содержаниях его в руде 0,06 % и 0,03 % соответственно.

Прогнозные ресурсы никеля по категории P_1 оценены в количестве от 9,0 тыс. т до 15,8 тыс. т. при среднем содержании его в руде 1,62 % и 0,84 % соответственно.

Серпентиниты, вмещающие породы для медно-никелевых руд и залежей талькового сырья, могут представлять интерес как декоративный материал и иметь промышленное значение для производства строительных и облицовочных материалов. Известны технологии комплексной переработки серпентинитов с целью получения из них высокочистого оксида магния, высокодисперсного оксида кремния, азотно-магниевого удобрений, магнезиальных вяжущих, адсорбентов. Одним из направлений использования серпентинитов является получение на их основе

магнезиальных керамических материалов. Разнообразные типы магнезиальной керамики (форстеритовая, стеатитовая, кордиеритовая) не обладают едиными свойствами: у одного доминирует высокая стойкость к термоударам (кордиерит), у другого – высокая огнеупорность (форстерит) и высокочастотные свойства (стеатит). В большинстве случаев в них сочетается комплекс свойств, необходимых для использования изделий в самых различных условиях. Так, например, кордиеритовая керамика используется в производстве кислотостойких, термостойких электроизолирующих изделий, в том числе носителей катализаторов для очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, фильтров для очистки воды и других сред.

Целью данной работы является исследование минералого-технологических свойств серпентинитов Светлоозерского месторождения для выявления областей их практического применения.

Требования промышленности к магнезиальному сырью

Возможность использования магнезиального сырья в различных направлениях определяется рядом факторов: постоянством состава, содержанием сопутствующих минералов, количеством примесей, а также структурой, размером и характером распределения зерен магнезиальных и сопутствующих минералов.

Примеси усложняют технологическую переработку сырья и ухудшают свойства получаемых материалов. Присутствие в магнезиальном сырье оксидов кальция, алюминия, железа оказывает отрицательное влияние на свойства получаемых из него огнеупоров и электрокерамики, снижая огнеупорность и электросопротивление [1]. Содержание оксида железа в сырье для производства, например, термостойкой кордиеритовой керамики не должно превышать 3,5 %, для высоковольтных стеатитовых изделий – 1–1,5 %. В отличие от других областей применения, большое количество железа в серпентините, используемом в качестве заполнителя бетона для биологической защиты атомных реакторов, не является недостатком, а наоборот, повышает защитные свойства бетона [9].

Серпентиниты

Пробы серпентинитов для исследований отобраны из керна скважин, пробуренных в пределах Западно-Светлоозерского массива. На ри-

сунке 1 показано расположение скважин. Минеральный состав серпентинитов изучен с использованием методов оптической и электронной микроскопии, микрозондового, рентгенофазового и термического анализов. Определение химического состава породообразующих минералов проведено на микроанализаторе INCA Energy 350 на базе сканирующего микроскопа VEGA II LSH в ИГ КарНЦ РАН. Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре ARL X'TRA с излучением $\text{CuK}\alpha$ в области углов $2\theta = 2\text{--}90^\circ$, с использованием программы Siroquant для количественного анализа содержания основных минералов в образце. Дифференциально-термический анализ выполнен на дериватографе фирмы MOM (Венгрия) в области температур 25–900 °C. Для анализа использовались навески 200 мг, скорость нагрева образцов составляла 10 °/мин. Интерпретация термограмм проводилась по литературным источникам [2,8].

В таблице 1 представлен химический состав проб (по данным силикатного анализа, выполненного в ИГ КарНЦ РАН), в таблице 2 – минеральный состав проб, рассчитанный по данным рентгенофазового анализа, в таблице 3 – средний состав и формульные коэффициенты серпентина, на рисунке 2 приведены термограммы серпентинитов.

Данные химического и минерального анализа серпентинитов свидетельствуют, что по содержанию MgO , CaO , SiO_2 , Al_2O_3 они отвечают требованиям к сырью для огнеупоров, электрокерамики, жаростойких цементов, металлургии, однако содержат повышенное количество оксидов железа в виде магнетита, поэтому применение этих пород в данных направлениях связано с необходимостью получения маложелезистых концентратов. Ранее выполненные исследования [3] по обогащению серпентинитов Светлоозера и Аганозерско-Бураковской расслоенной интрузии методом магнитной сепарации показали, что на возможность их получения оказывает влияние размер и характер распределения зерен магнетита в серпентините. В серпентините Аганозера зерна магнетита были расположены как между агрегатами серпентина, так и внутри них, часто в виде микровключений, что не позволило получить кондиционный концентрат, в то же время в пробе Светлоозера магнетит располагался, главным образом, по границам серпентиновых агрегатов. Из серпентинита Светлоозера был получен серпентиновый концентрат, содержащий

3,75 % общего железа, что почти удовлетворяло требованиям к сырью для термостойкой кордиеритовой электрокерамики. На основе данного концентрата была получена кордиеритовая керамика, обладающая электроизолирующими свойствами и низким коэффициентом термического

расширения, обуславливающим термостойкость материала. Таким образом, по результатам предыдущих исследований был сделан вывод, что Светлоозерский серпентинит является перспективным сырьем для получения кордиеритовой керамики.

Таблица 1

Химический состав серпентинитов, мас. %

Оксиды	C-4-41,1	C-7-60,4	C-7-161	C-8-51,8	C-10-13,3	C-10-25
SiO ₂	37,94	35,30	36,64	35,52	35,42	36,22
TiO ₂	0,09	0,12	0,08	0,08	0,15	0,19
Al ₂ O ₃	1,25	1,24	2,04	0,21	3,05	2,25
Fe ₂ O ₃	8,47	4,56	4,65	10,69	6,70	7,71
FeO	4,17	6,47	6,68	2,59	3,33	3,55
MnO	0,09	0,095	0,132	0,13	0,162	0,201
MgO	36,78	36,44	33,95	38,18	35,19	36,80
CaO	<0,01	<0,01	0,88	–	2,04	0,073
Na ₂ O	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
K ₂ O	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
H ₂ O	0,099	0,14	0,26	0,21	0,36	0,44
ппп	10,64	14,94	14,01	11,24	12,97	11,83
P ₂ O ₅	0,035	0,05	0,03	0,03	0,04	0,08
Cr ₂ O ₃	0,016	0,022	0,02	0,888	0,02	0,35
V ₂ O ₅	0,037	0,044	0,056	0,02	0,034	0,02
CoO	0,019	0,013	0,018	0,021	0,014	0,018
NiO	0,170	0,266	0,283	0,258	0,157	0,185
CuO	0,011	0,004	0,004	0,002	0,006	0,001
ZnO	0,007	0,007	0,011	0,013	0,008	0,013
S	3,68	1,18	1,38	не опр.	–	–
CO ₂	1,31	4,43	4,6	–	2,22	1,67
Сумма	100	100,2	100,2	100,13	99,93	99,9

Примечание: здесь и далее название образца содержит номер скважины и глубину отбора в метрах.

Таблица 2

Минеральный состав серпентинитов, мас. %

№ п/п	№ пробы	серпентин	магнетит	магнезит	доломит	кальцит	талек	брусит	оливин
1	C-4-41,1	79	13	8					
2	C-7-60,4	75	12	13					
3	C-7-161	73	9	8	4		6		
4	C-8-51,8	88	8					4	
5	C-10-13,3	88	8			4			
6	C-10-25	94	4						2

Проведенные нами исследования показали, что на получение маложелезистых концентратов оказывает влияние не только содержание,

размер и характер распределения зёрен магнетита, но и содержание катионов Fe в самом серпентине.

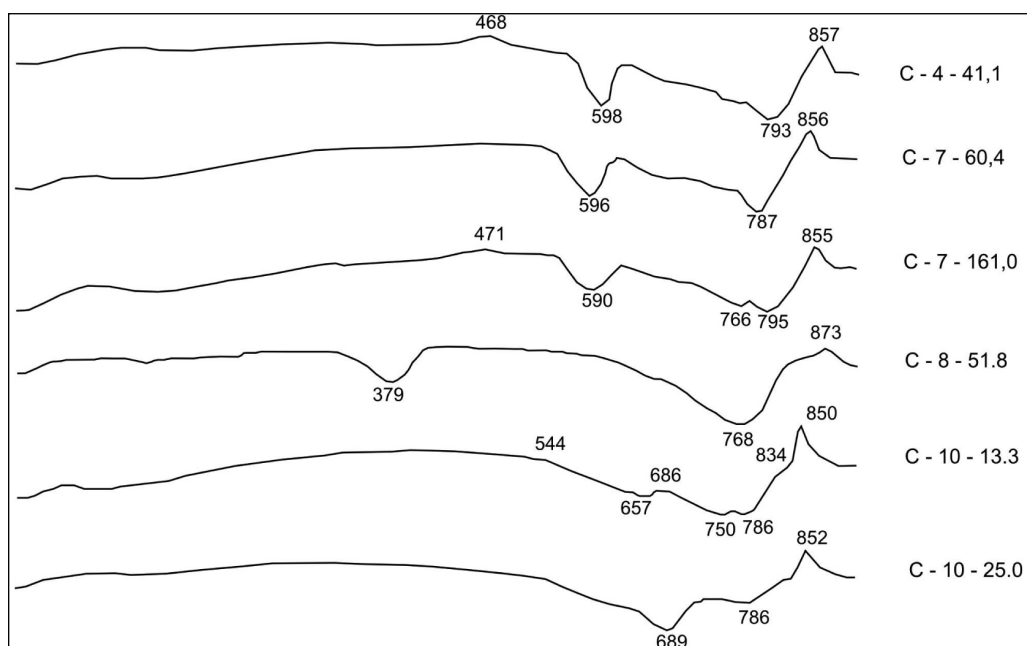


Рис. 2. Термограммы серпентинитов

По результатам комплексных минералогических исследований установлено, что изученные пробы серпентинитов характеризуются разнообразием минерального состава и различиями в химическом составе породообразующего серпентина, отражающими многоэтапную историю метаморфогенно-метасоматических процессов в Западно-Светлоозерском массиве. В исследованных пробах отмечено высокое содержание серпентина (73–94 %), сопутствующие минералы: брусит, карбонаты магния (магнезит, доломит), кальцит, магнетит, сульфиды железа и никеля (пирротин, халькопирит, пентландит, пирит и др.).

Скважиной 10 (пробы С-10–13,3 и С-10–25) вскрыты наименее измененные ультрамафиты с реликтами оливина и пироксена. В породе установлено две генерации серпентина, слагающего псевдоморфозы по первичным силикатам: ранний петельчатый серпентин (лизардит), в виде шнуров рассекающий кристаллы оливина (рис. 3а), и более поздний пластинчатый антигорит, развивающийся по петельчатому серпентину. Размер выделений от мкм до 1,6 мм. На термограммах лизардит и антигорит характеризуются эндотермическими эффектами при температурах 657–689°C и 786°C, соответственно, обусловленными разрушением структуры серпентина с одновременным выделением конституционной воды.

Окраска серпентина меняется от желтовато-зеленой у лизардита до бесцветной у антигори-

та, что обусловлено их различием в железистости. Петельчатому серпентину свойственен неоднородный химический состав с широкими вариациями железистости от 5 до 23 % (рис. 3б). Антигорит имеет более низкие значения железистости – в среднем 3 % и большие концентрации SiO_2 , а также содержит Al_2O_3 в среднем 2 % (табл. 3). Снижение железистости антигори-та сопровождается обильным выделением магнетита.

В целом, рудные минералы распределены в серпентините в виде тонкой сыпи (преимущественно приуроченной к интерстициям между псевдоморфозами по оливи-ну), цепочек по границам первичных силикатов, вдоль шнуров, рассекающих зерна оливина, а также в виде секущих прожилков (рис. 3а, б, в).

Следует отметить, что, по сравнению с другими инструментальными методами исследования, термический анализ позволяет точно диагностировать минералы группы серпентина в породах [8]. За исключением проб из скважины 10, основной разновидностью серпентина является антигорит, что подтверждает его определение оптическими методами, с характерным эндоэффектом в области температур 760–800 °C и последующим экзоэффектом около 850 °C, обусловленным упорядочением структуры форстерита, образованного при дегидратации серпентина. Эндоэффекты в области 590–600°C характеризуют разложение магнезита, при 750 °C – кальцита, при 766°C – начало диссоциации до-

ломита. В исследованных образцах карбонаты приурочены к прожилкам, за исключением проб

скважины 7, где они развиты также и в основной массе пород.

Таблица 3

Состав (мас. %) и формульные коэффициенты серпентина

Компонент	C-4-41,1	C-7-60	C-7-161	C-8-51,8	C-10-13,3		C-10-25	
	Atg	Atg	Atg	Atg	Lz	Atg	Lz	Atg
SiO ₂	43,5	43,24	44,14	43,02	38,4	42,83	39,4	42,65
Al ₂ O ₃	0	0,12	0	0,12	0	2,01	0	38
Cr ₂ O ₃	0,08	0,13	0,09	0	0	0	0	0
FeO*	1,15	5,45	5,75	0,98	11,46	2,72	6,31	2,43
MnO	0	0	0	0	0,58	0	0	0
MgO	39,44	36,82	36,86	40,72	35,6	38,14	38,04	38
сумма	84,18	85,76	86,83	84,84	86,05	85,7	83,75	84,38
Si	1,87	1,74	1,72	1,93	1,89	1,79	1,87	1,81
Al	0	0,01	0	0,01	0	0,11	0	0,07
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ²⁺	0,05	0,21	0,22	0,04	0,47	0,11	0,26	0,1
Mn	0	0	0	0	0,02	0	0	0
Mg	3,08	3,04	3,06	3,03	2,61	2,99	2,88	3,02
f	2	7	7	1	15	3	8	3

Примечание. FeO* – суммарное железо в форме FeO; $f = (Fe^{2+}+Mg)/Fe^{2+} \times 100 \%$ – коэффициент железистости. Atg – антигорит, Lz – лизардит.

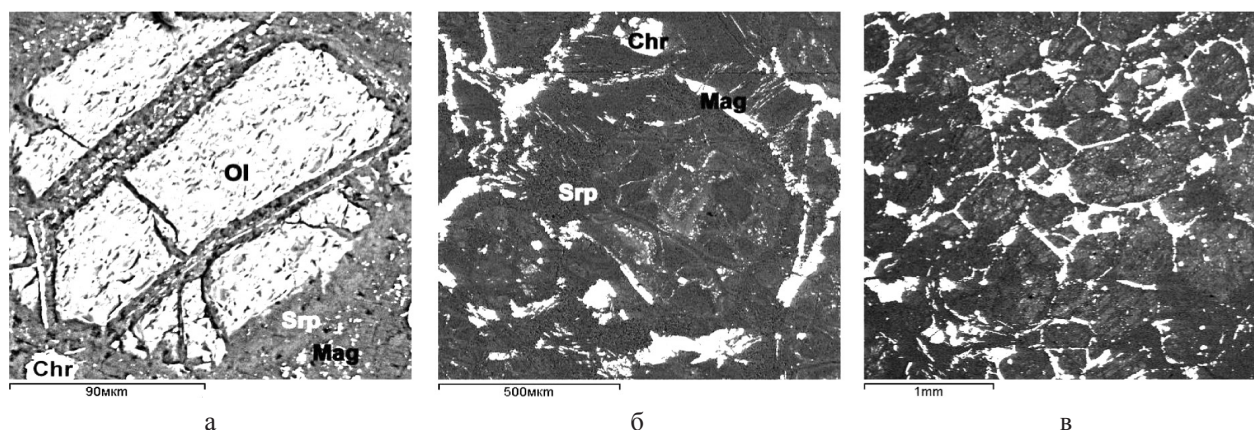


Рис. 3. Микрофотографии серпентинита (проба C-10-25): а – замещение оливины лизардитом; б – псевдоморфозы по оливину, сложенные серпентином различной железистости: наиболее светлые области соответствуют серпентину с высокой железистостью, темные – менее железистому серпентину; в – характер распределения рудных минералов. Chr – хромит, Mag – магнетит, Ol – оливин, Srp – серпентин

Серпентинит скв. 8 (C-8-51,8) представляет собой агрегат пластинок антигорита размером 1 мкм–0,4 мм и брусита. Железистость антигорита низкая – 1 %. На термограмме брусит диагностируется по эндотермическому эффекту при температуре около 380°C, обусловленному дегидратацией с образованием периклаза. Рудные минералы размером от мкм до 1,2 мм распределены как в виде рассеянной вкрапленности, так и в виде цепочек вокруг псевдоморфоз по оливину.

Серпентинит скв. 4 (C-4-41,1) отличается от серпентинитов других проб наибольшим количеством магнетита в ассоциации с антигоритом двух генераций – ранним крупнопластинчатым (0,15–1 мм), формирующим сноповидные агрегаты, и поздним тонкопластинчатым (мкм–0,1 мм). При этом магнетит в виде сыпи располагается преимущественно по периферии сноповидных агрегатов (рис. 5), в области развития антигорита второй генерации. В данной пробе серпентин имеет пониженную железистость – 2 %.

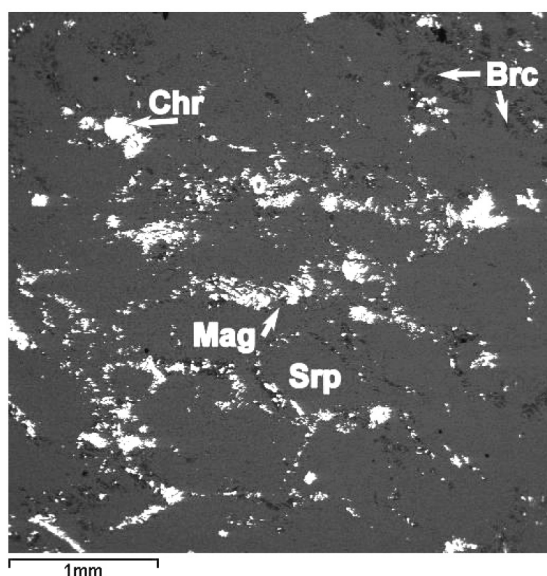


Рис. 4. Выделения рудных минералов по границам псевдоморфоз по оливину в пробе С-8-51,8.

Brc – брусит, Mag – магнетит, Srp – серпентин (фото в отраженных электронах)

Серпентиниты скв. 7 представлены ультрамафитами, в различной степени измененными процессами карбонатизации и оталькования.

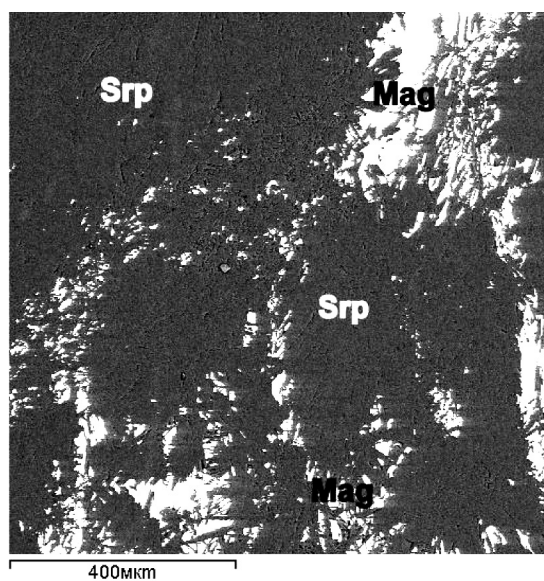


Рис. 5. Характер распределения рудных минералов в пробе С-4-41,1. Mag – магнетит, Srp – серпентин

Проба С-7-60,4 сложена карбонат-серпентиновой породой, в которой карбонат ряда магнетит-сидерит (железистость от 3 до 8 %) образует порфиробласты и прожилки в мелкозернистой основной массе чешуйчатого антигорита ранней генерации. Антигорит поздней генерации, характеризующийся тонкопластинчатой, игольчатой формой выделения, сечет все

породообразующие минералы, включая рудные (рис. 6). Антигорит имеет повышенную железистость (7 %) для обеих генераций. Размер зерен серпентина 10 мкм – 0,7 мм. Рудные минералы размером до 1,2 мм развиты в виде рассеянной вкрапленности, цепочек по границам апооливиновых псевдоморфоз, прожилков.

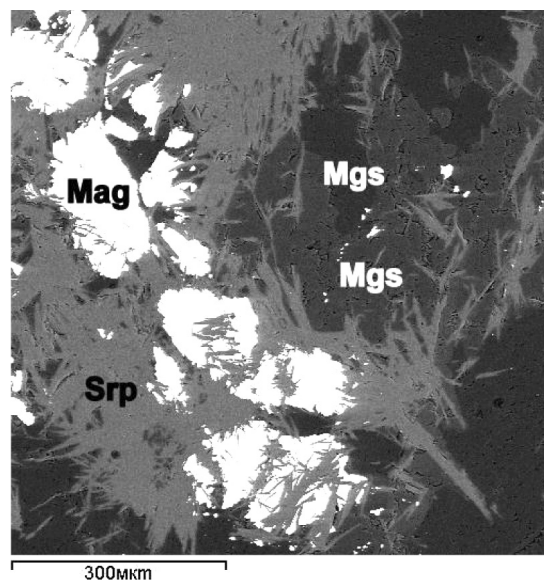


Рис. 6. Микроструктура карбонат-серпентиновой породы пробы С-7-60,4. Mag – магнетит, Mgs – магнетит, Srp – серпентин

Установленная неоднородность породообразующего серпентина по содержанию FeO является следствием смены физико-химических условий минералообразования (температуры, кислотности-щелочности растворов и окислительно-восстановительного потенциала) на разных этапах метаморфизма в пределах Западно-Светлоозерского массива.

Вследствие вхождения железа в кристаллическую решетку серпентина, а также присутствия в зернах микровключений магнетита, только некоторые разновидности серпентинита перспективны для получения маложелезистого концентрата, удовлетворяющего требованиям огнеупорной и керамической промышленности. На основе маложелезистого серпентинового концентрата, полученного из пробы С-8, был разработан состав и получены образцы кордиеритовой керамики с электроизолирующими свойствами и низким коэффициентом термического расширения [3]. Основные характеристики керамики находятся в пределах требований к пористым кордиеритовым материалам [5]: диэлектрическая проницаемость – 2,97; удельное электросопротивление – 8,1; диэлектрические потери – 0,04; плотность – 2,08 г/см³, водопоглощение – 12 %; ТКЛР – 1,1×10⁻⁶ 1/°C.

Вывод

Исследование серпентинитов различных частей Западно-Светлоозерского массива выявило различия в химическом составе порообразующего серпентина, главным образом, в содержании FeO, отражающие физико-химические условия формирования серпентинитов. Наряду с данными о концентрации, размере и характере распределения зерен сопутствующих минералов, это необходимо учитывать при выборе направлений использования данного вида сырья.

Выполненные минералого-технологические исследования позволили выделить разности серпентинитов с низким содержанием железа в серпентине, которые могут быть рекомендованы в качестве сырья для получения технической и термостойкой керамики. Разности серпентинитов с высоким содержанием железа в серпентине можно рекомендовать только для использования в тех направлениях, где содержание железа лимитируется не очень жестко (строительная керамика, биологическая защита атомных реакторов и т. д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Будников П. П., Балкевич В. Л. и др. Химическая технология керамики и огнеупоров. М., Изд-во литературы по строительству, 1972. 551 с.
2. Иванова В. П., Касатов Б. К. и др. Термический анализ минералов и горных пород. Л., Недра 1974, 399 с.
3. Каменева Е. Е., Лебедева Г. А., Соколов В. И., Фролов П. В. Исследование вещественного состава и технологических свойств серпентинитов Карелии. // Современные методы минералого-геохимических исследований как основа выявления новых типов руд и технологии их комплексного освоения. Материалы годичного собрания Российского минералогического общества. Спб., 2006. С. 22–24.
4. Кулешевич Л. В. Метаморфизм и рудоносность архейских зеленокаменных поясов юго-восточной окраины Балтийского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. 267 с.
5. Масленникова Г. Н., Харитонов Ф. Я., Костюков Н. С., Пирогов К. С. Технология электрокерамики. М., 1974. 224 с.
6. Минерально-сырьевая база республики Карелия. Книга 2. Неметаллические полезные ископаемые. Петрозаводск: «Карелия», 2006, 353 с.
7. Романович И. Ф. и др. Месторождения талька СССР. М.: Недра, 1973. 224 с.
8. Савельев Д. Е. и др. Серпентинизация ультрабазитов Кыштымской площади // Геологический сборник Института геологии Уфимского НЦ РАН. №8. 2009. С. 129–137.
9. Серпентинит в защите атомных реакторов. Под ред. Ю. А. Егорова. М., 1973. С. 103–104.
10. Фролов П. В., Фурман В. Н. Светлоозерское проявление руд железистого талька – эталонный объект комплексных месторождений зеленокаменных поясов Карелии. // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 6. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 58–66.
11. Тытык В. М. и др. Отчет о результатах геолого-разведочных работ первого этапа (предварительная разведка), проведенных на Лебяжинском, Светлоозерском, Восточно-Вожминском и Золотопорожском медно-никелевых и Северо-Вожминском медно-цинковом месторождениях в Сегежском и Медвежьегорском районах РК в 1990–1994 гг. по договору с Текобанком (объект Кивиярви). Петрозаводск, 1997. Фонды КГЭ.
12. Фурман В. Н. и др. Отчет о результатах поисковых и поисково-оценочных работ на карбонатальковые руды в пределах Светлоозерского массива ультрамафитов в 1990–1994 г. Петрозаводск: КГЭ, 1995. Фонды КарТФГИ.

АТЛАС СТРУКТУР ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Щербакова Н. Н.¹, Букина Т. Ф.¹, Россихина Г. С.², Толубаева Н. В.³

¹ НИИ ЕНЦГУ, Саратов, nn-sar@mail.ru

² ООО «Северсталь – Промсервис», г. Череповец

³ ОАО СО, г. Семилуки

Разработка технологии производства огнеупорного материала основывается на четком управлении процессами формирования его

структуры. Как бы ни были информативны современные физико-химические методы исследования, для технологов и разработчиков

огнеупорных материалов и изделий весьма значимо визуальное представление о структуре материала, знание законов ее развития в пространстве и времени, в температурном интервале, т. е. в совокупности технологических факторов. Информация, полученная в результате минералогических и петрографических исследований, позволяет определить их взаимосвязь и связь с конкретной структурой материала.

Представляемый атлас является результатом обширного исследования огнеупорного алюмосиликатного сырья и формирования новой структуры в процессе термического воздействия.

Подготовка образцов. Образцы сырьевых и огнеупорных материалов отбирались из числа сертифицированной продукции, присутствующей на Российском рынке огнеупорных материалов. Образцы для приготовления шлифов получены по методике, разработанной непосредственно авторами [1,2].

Изготовление прозрачных шлифов проводилось по классической методике приготовления шлифов для петрографических исследований.

Фотографии получены с использованием фотоаппарата Зенит-Е в виде приставки для микроскопа марки Полам – Л-211. Представленные снимки хорошо передают цвет и микроструктуру материалов.

Форма минеральных индивидов в техническом камне – важный диагностический признак, и является функцией его химического вещества и структуры, собственно шамотные алюмосиликатные огнеупоры получают из огнеупорных пластичных глин и каолинов[3]. На рисунке 1 представлена фотография шлифа образца классического алюмосиликатного огнеупорного заполнителя – шамота. Шамот получен путем обжига огнеупорной глины в промышленной шахтной газопламенной печи при 1350–1400°C. Фотографии наглядно демонстрируют характер пористости и различные кристаллические структуры, образующиеся в зерне шамота (рис. 1).

Фотографии отображают типы кристаллов, их вид при параллельных и скрещенных поляроидах (рис. 2, а, б). Фотографии сопровождаются описанием видимых структур и условий их образования – температурный режим, газовая атмосфера и т. д. В таблице 1 – пример описания образца, из которого сделаны шлифы к рисункам 1 и 2 а, б.

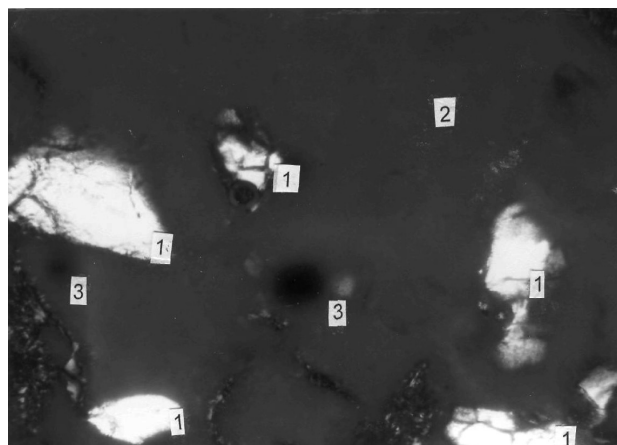


Рис. 1. Шамот; т/о 1350–14000С.
Кристаллы кианита (1) в обломке шамота (2).
Характер пористости: поры черные (3).
Поляроиды +, увел. ×150

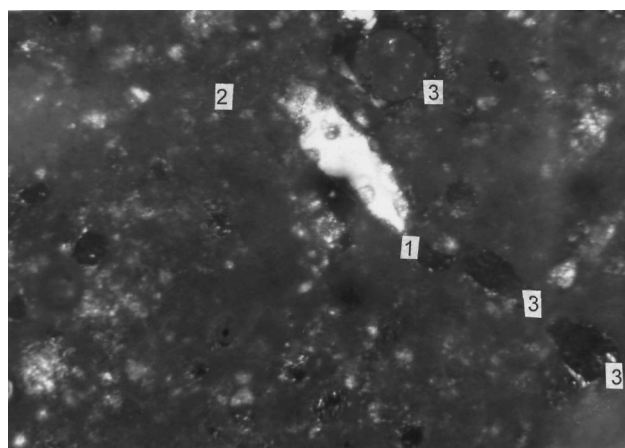
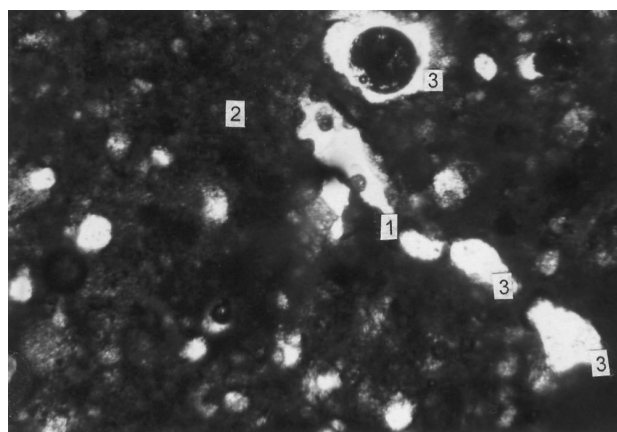


Рис. 2. Шамот, т/о 1350–14000С. Кристалл силлиманита (1) в шамоте (2): а – поляроиды //, увел. ×150.
Поры светлые (3). б – поляроиды +, увел. ×150.
Поры черные (3)

Ниже, на рисунке 3 представлена общая структура материала трамбованного обожженного изделия – бруса с шамотным заполнителем на глиняной связке.

Таблица 1

Пример описания исследованного образца шамота

№ п/п	Тип образца	Особенности материала образца, условия формирования структуры			Макроскопическое описание образца	Микроскопическое описание образца при увеличении 100, 300 крат		Примечание
		Марка	Т°С	Атмосфера		Заполнитель	Особенности пористости	
1	Шамот обож-женная огне-упорная глина	Сод. Al_2O_3 не < 36 %	1380	Газопла-менная печь	Материал светло-розового цвета легкий, с белесыми и серыми обособлениями, с трещинами усыхания, образовавшимися при обжиге. Наблюдается неравномерная пигментация вещества гидроокислами железа(ГОЖ).	7 Формирование муллита выражено в образовании короткопризматических кристаллов размером 0,02–0,005 мм. В каолиновых светло-серых фрагментах глин образуются волокнистые и микропризматические агрегаты кристаллов толщиной не более 0,005мм. В темно-серых глинах муллитизация выражена слабее в образовании облаковидных сгустков. В бурых глинах с диффузионным распределением ГОЖ, муллит почти не замечен. Кристобалит определяется в самых тонких участках шлифа (см. примечание). Изредка встречаются новообразованные кристаллы и кианита (см. рис. 1–1) силлиманита (см. рис. 2а,б-1)	8 Большое количество пор различной формы, вероятно, связано с интенсивным перераспределением газо-образной и жидкой (водосодержащей) фаз. Сливающиеся поры образуют сложные системы.	9 Для получения шлифа образец был пропитан эпоксид-ным клеем.

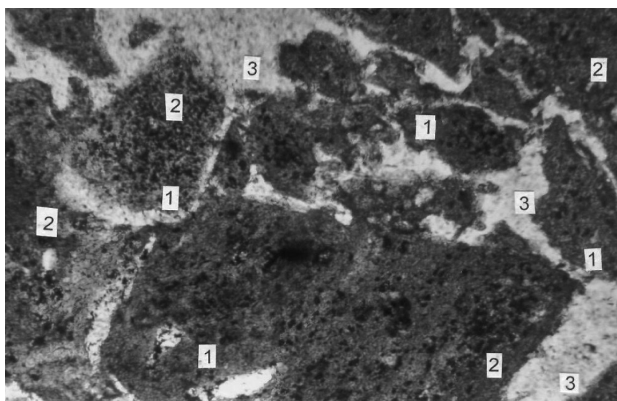


Рис. 3. Шамотный брус; т/о 1325–1350 °С.

Общая структура материала.

Видны разноориентированные фрагменты шамота (1) с мелкими непрозрачными включениями (2); большое количество пор, видны крупные поры (3).

Поляроиды //, увел. $\times 150$

Весьма широк спектр современных огнеупорных материалов, изготовленных по бетонной технологии [4]. Важное отличие алюмосиликатных огнеупорных бетонов от трамбованных изделий – сложная связка на основе кальций – алюминатных цементов, в которой в процессе термообработки при производстве и в условиях эксплуатации происходит формирование огнеупорной структуры. На рисунках 4 и 5 представлена динамика структурообразования в огнеупорных бетонах в зависимости от температуры обжига.

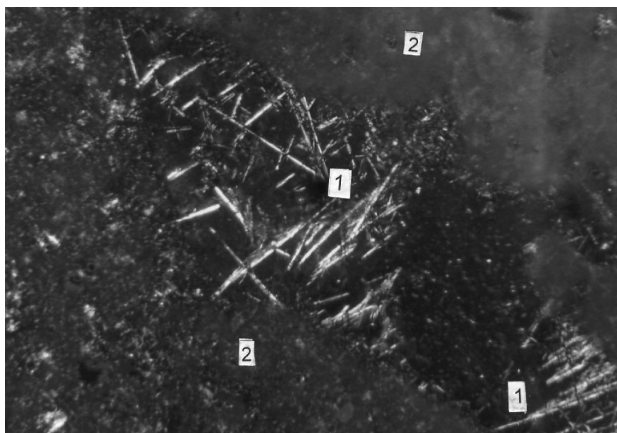


Рис. 4. Огнеупорный бетон с шамотным заполнителем; т/о 1400 °С. Образование игольчатых кристаллов муллита (1) между фрагментами шамота (2).

Поляроиды +, увел. $\times 150$

При выборе огнеупоров для строительства и ремонта теплового агрегата очень важна информация о структурных превращениях в материале в процессе службы. На рисунке 6 представлен вид огнеупорного низкоце-

ментного бетона после эксплуатационных испытаний в восстановительной атмосфере при 950–995 °С.

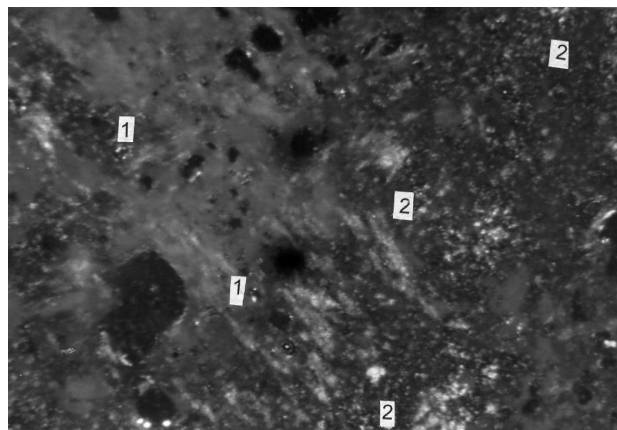


Рис. 5. Огнеупорный бетон; т/о 1400 °С. Переход каолинита в муллит в мелких фрагментах шамота (1); замещение материала связки слабоанизотропным тонкозернистым веществом (2).

Поляроиды +, увел. $\times 150$

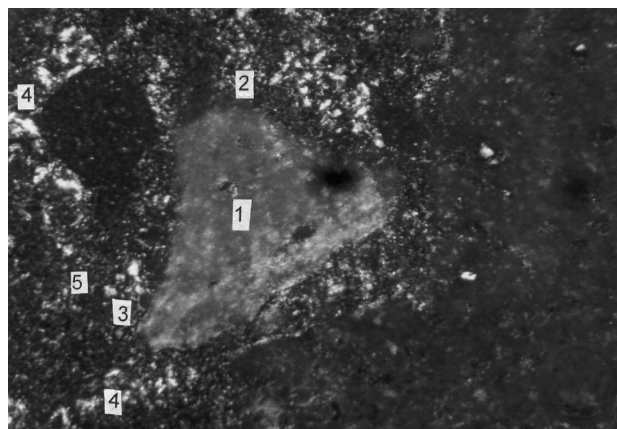


Рис. 6. Огнеупорный низкоцементный бетон; (т/о 1400 °С) после испытаний в восстановительной атмосфере при 950–995 °С. Видна высокая степень кристаллизация муллита в шамоте (1). Выявляется интенсивная перекристаллизация материала связки (2) с образованием мелкозернистого кварца (3); агрегатов с табличками плагиоклаза (4) и тонковолокнистого муллита (5). Поляроиды +, увел. $\times 150$

Исследование образцов огнеупоров зарубежного производства дает представление о качестве материала и его эксплуатационных характеристиках. На рисунке 7 представлен огнеупорный бетон, фрагмент крупного заполнителя – шамота сложного состава. Исследование шлифа с видом заполнителя и связки дает представление о температуре обжига изделия, составе исходных глин и составе связки и т. д.

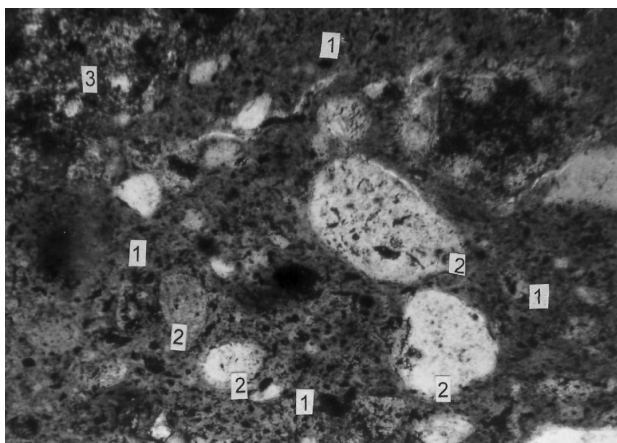


Рис. 7. Огнеупорный бетон; т/о порядка 1000°C.
Определяется двухфазный состав фрагмента шамота:
основного (1) а также включений овального и круглого
сечения (2), связка (3).
Поляроиды //, вел. $\times 150$

Представленные в разработке материалы дают обширную характеристику алюмосиликатных огнеупорных структур. Методики, фотографии и описания могут использоваться:

- для научных исследований, при разработке новых видов огнеупорных материалов, в т. ч. неформованных – сухих масс и бетонов
- при техническом контроле в производстве огнеупорного сырья, огнеупоров и керамики, в производстве стекла.
- для исследования эксплуатационной стойкости огнеупоров в условиях промышленного производства стекла, металлов, огнеупоров и т. д.

Другое направление – как учебное пособие для технологических вузов и центров по обучению технического персонала для производств тугоплавких неметаллических материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Россихина Г. С., Букина Т. Ф., Щербакова Н. Н., Щедрин М. П., Толубаева Н. В. Петрографические исследования поровой структуры огнеупорных бетонов алюмосиликатного состава // *Стекло и керамика*, 2007. № 5. С. 26–28.
2. Россихина Г. С., Щербакова Н. Н., Щедрин М. П., Букина Т. Ф., Толубаева Н. В. Исследования огнеупорных бетонных материалов алюмосиликатного состава

ва методами петрографии // *Стекло и керамика*, 2007. № 11. С. 28–31.

3. Перепелицин Б. А. Основы технической минералогии и петрографии. М.: Недра, 1987. 255 с.

4. Щедрин М. П., Щербакова Н. Н. Перспективы потребления, развития производства и разработки новых видов огнеупорных материалов для стекольной промышленности // *Вестник СГТУ. Саратов*. 2007. С. 58–62.

ОБОГАЩЕНИЕ ГЛАУКОНИТОВЫХ ПЕСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Щербакова Н. Н.¹, Синельцев А. А.²

¹ ООО «ЭкоСорбент», ² ООО «Наносоорбент», г. Саратов, nn-sar@mail.ru

Саратовская группа месторождений глауконитсодержащих пород растянута по правому берегу Волги на расстоянии до 200 км от побережья, местами обнажаясь на поверхности. Глауконит распространен в осадочных породах морского происхождения: песках, песчаниках, глинах, алевроитах, опоках и мергелях, содержание глауконита в породах достигает 36–40 % и участками до 65 %. Наибольшие концентрации (более 40 %) глауконита отмечены среди песчано-алевритовых образований верхнего мела в Ртищевском и Лысогорском районах области.

При выборе месторождения и отработке технологических приемов обогащения были проведены исследования фракционного, химического и минерального состава песков пяти месторождений разных районов Саратовской области.

Подготовка проб. Пробы глауконитового песка предварительно просушивались при 100 ± 5 °C, просеивались от органических и прочих включений и помещались в герметичную тару, откуда отбирались навески для проведения параллельно других анализов.

Методы анализа. Исследования проводились на базе центра коллективного пользования

Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

Фазовый состав образцов определялся с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3, исследования рельефа и морфологии проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA II LMU, элементный состав исследуемых образцов определялся с помощью энергодисперсионного флуоресцентного рентгеновского спектрометра фирмы SHIMADZU серии RAYNY EDX-720.

Определение удельной поверхности, общей пористости, распределения пор по радиусам с выделением доли наноразмерных пор на исследуемых образцах проводились на быстродействующем анализаторе сорбции газов фирмы QUANTA-CHROME INSTRUMENTS серии NOVA 1200 E.

Минеральный состав песков определялся как классическим оптическим методом, так и методом РКФА (Рентгенографический количественный фазовый анализ). Тип прибора Дифрактометр D8 ADVANCE фирмы Bruker. Режим съемки: С и К – излучение, 40kV, 30 mA, экспозиция 1 сек. Содержание глауконита принято эквивалентным глинистой фракции настоящей пробы, что характерно для минералов глауконитовой группы. Глинистая фракция состоит из двух минералов а) смешанослойная слюда-монтмориллонит с содержанием до 20 % разбухающих слоев и в) смешанослойная монтмориллонит-слюда с содержанием 25–30 % неразбухающих слоев. В таблице 1 приведены данные РКФА для проб глауконитового песка из Лысогорского района.

Таблица 1

Результаты анализа пробы глауконитового песка методом РКФА

№ пробы	Содержание минералов, вес. %					
	глауконит	Кварц	Слюда (мусковит)	Полевые шпаты	Цеолит	Хлорит
P-2/15	37–6	46–6	4±1	8–2	4±1	1+0,5

Минералогический состав фракций песка ставлен состав песка Красноармейского района определялся оптическим методом, в табл. 2 пред- саратовской области.

Таблица 2

Минералогический фракционный состав песка Красноармейского месторождения

Фракционный состав пробы					
Размеры частиц, мм	0,63–0,45	0,315	0,25–0,2	0,125	0,1–0,08
Содержание фракции в пробе, %	0,136	0,475	18,53	60,255	17,449
Минеральный состав по фракциям, %					
Кварц	10–15	26,9	55,6	60,9	61,5
Глауконит	5–10	34,2	15,6	25,0	22,0
Мусковит	70–75	23,4	8,2	1,0	0,7
Полевые шпаты		4,0	15,6	7,8	9,0
Гидрослюда		6,0	2,6		
Кальцит		0,5			
Агрегаты глинистые			1,2	3,8	5,0
Хлорит				0,2	
Прочие	3–5	5,0	1,2	1,3	1,8
Примечание	Глауконит размером менее 0,1 мм	Глауконит в виде мелких зерен (0,25–0,2 мм) прилипших к чешуйкам мусковита			Фракции менее 0,08 содержат от 30 до 50 % глауконита

Проведены всесторонние исследования образцов глауконитового песка с помощью сканирующего электронного микроскопа. Песок состоит из частиц неоднородных по размеру и ис-

следования проводились по области, захватывающей несколько различных частиц образца. Проведено картирование химического элементного состава выбранной области. На рис. 1 приве-

дено электронное изображение области химического микроанализа глауконита Белозерского месторождения.

Результаты химического микроанализа по указанной области представлены в табл. 3. В пяти пробах глауконитовых песков обнаружено до 18 элементов. В меньшем количестве по сравнению с другими классами находится алюминий, рутений, фосфор и титан, а также рубидий, выявлено и золото.

Планируемое направление дальнейших работ – выделение из исследованного глауконитового сырья примесей, присутствующих в малом количестве: рутений, фосфор и титан.

Результаты химического анализа проб глауконита по каждому исследованному месторождению сведены в отдельные таблицы с перечнем составляющих оксидов (пример – табл. 4), сравнение которых позволило выявить наиболее перспективные месторождения глауконита в Саратовской области.

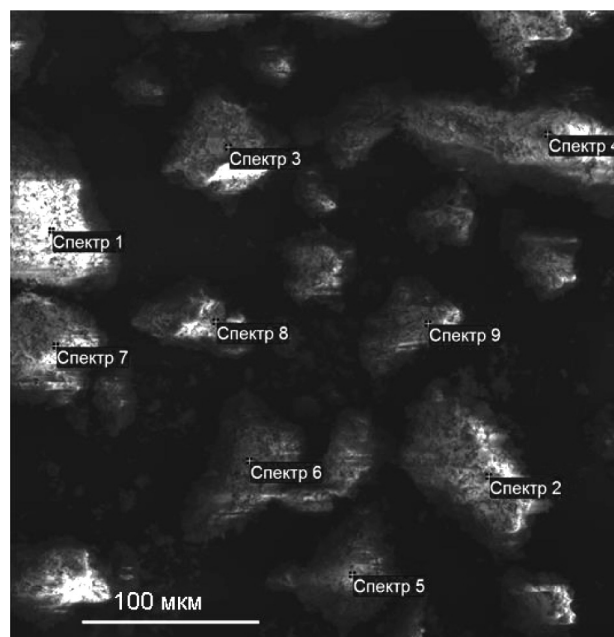


Рис. 1. Область химического микроанализа глауконита Белозерского месторождения

Таблица 3

Элементный состав в случайно выбранных точках, вес. %

Спектр	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Спектр 1	55,84	1,45	4,58	29,96	2,32	0,63	5,22
Спектр 2	54,96	2,12	2,58	23,11	4,37	0,37	12,49
Спектр 3	47,82	1,47	2,24	27,65	5,39	0,64	14,78
Спектр 4	39,80	0,47	2,50	47,13	1,48	3,31	5,31
Спектр 5	59,77	0,70	3,00	32,37	1,03	0,50	2,64
Спектр 6	58,83	0,49	2,06	35,64	0,70	0,48	1,79
Спектр 7	58,75	0,91	2,25	33,73	0,98	0,74	2,64
Спектр 8	49,53	0,61	2,36	40,45	1,46	1,46	4,12
Спектр 9	38,14	0,72		2,11		58,25	0,78
Суммарный спектр	51,19	0,97	2,67	29,66	2,22	7,27	6,02

Таблица 4

Усредненный химический состав глауконита Белозерского месторождения

№ п. /п.	Оксиды	Содержание, вес. %
1	Fe ₂ O ₃	19,800
2	SiO ₂	43,604
3	Al ₂ O ₃	17,436
4	K ₂ O	16,459
5	CaO	1,530
6	TiO ₂	–
7	RuO ₂	0,325
8	MnO	0,012
9	Cr ₂ O ₃	0,062
10	V ₂ O ₅	–
11	P ₂ O ₅	0,723

№ п. /п.	Оксиды	Содержание, вес. %
12	SrO	0,010
13	Y ₂ O ₃	0,003
14	ZrO ₂	–
15	Rb ₂ O	0,020
16	ZnO	0,008
17	CuO	0,008

Результаты определения удельной поверхности, общей пористости, распределения пор по радиусам с выделением доли наноразмерных пор образцов глауконита Белозерского месторождения приведены в табл. 5.

По результатам обобщения полученных данных установлено, что для обследованных месторождений глауконитовых песков Саратовского региона характерно:

1. Мелкофракционный состав, фракции <0,25 мм составляют более 80 % (77–89 %).
2. Основная фракция, содержащая наибольшее количество глауконита – 0,2–0,125 мм
3. Усредненный состав сырьевых песков, %:
Глауконит 37–50; кварц 46 ± 6 ; слюда-мусковит 4 ± 1 ; полевые шпаты 8 ± 2 ; цеолит

2 ± 1 ; хлорит $1 \pm 0,5$ и др.

4. Незначительное отделение глинистой фракции, полученной в процессе отмучивания в воде – всего около 5 %.

Проведенные исследования технологических свойств глауконитовых песков позволили начать эксперименты по выбору оборудования для удаления кварцевой составляющей и последующего измельчения глауконитовой части с целью получения концентрата необходимого фракционно-го состава.

Таблица 5

Удельная поверхность, общая пористость, распределения пор по радиусам образцов глауконита

Образец	Удельная поверхность, м ² /г	Общий объем пор, см ³ /г	Средний радиус микропор, нм	Распределение пор по радиусам, %				
				3–4	4–6	6–10	10–17	17–50
Глауконит Белозерского месторождения	128,3	0,286	11,1	1,5	5,0	14,6	19,5	59,4

Выбор обогащательного оборудования

Для отделения слабомагнитной фракции глауконита использовались два типа сепараторов: барабанный и валковый сепараторы. Эксперименты показали, что более эффективным является отделение магнитной фракции на высокоградиентном валковом магнитном сепараторе серии СМВИ (сепараторы с сильным полем, предназначенные для обогащения нерудных материалов и слабомагнитных руд). Использование такого сепаратора более эффективно, т. к. позволяет подвергать повторной очистке как магнитную глауконитовую фракцию, для удаления кварцевых включений, так и немагнитную фракцию для выделения более чистого кварцевого песка.

Продукт, получаемый в процессе обогащения – слабомагнитный железоксидный материал глауконит в количестве 35–50 % по весу от исходного сырья, в зависимости от количества стадий очистки.

Объемный насыпной вес, т/м³: до 1,6–1,8.

Удельный вес: 2,2–2,8 г/см³.

Содержание общего железа (в пересчете на Fe₂O₃) 18–29 вес. %.

Отходы – неметаллические включения: кварц, полевые шпаты, кальцит и др. Фракционный состав, мм: от 0,315–0,05 мм.

Допустимое содержание немагнитных примесей в обработанном глауконите не более 2 %.

Получение тонкодисперсных фракций глауконита

Для получения тонкодисперсных фракций глауконит подвергали измельчению в шаровой и вихревой мельнице, и мельнице ударного типа – дезинтеграторе. Шаровая мельница для разрабатываемого технологического цикла оказалась малоприспособна по причине длительности помола и значительного агрегирования частиц.

Измельчению в лабораторной вихревой мельнице подвергали навески глауконита, отобранные от магнитной фракции, полученной при сепарации. Измельчение показало, что только в результате 6–7 проходов через мельницу получено 41 % частиц менее 0,05 мм, что очень непроизводительно. Наиболее результативным оказалось измельчение в высокоскоростном дезинтеграторе (марка DESI-16) с выделением тонкой фракции на воздушном классификаторе, входящем в комплекс измельчительного узла: за 2...3 цикла помола получено около 30–40 % материала размером 30–50 микрон.

Комплекс проведенных исследований позволил составить исходные требования для проектирования опытно-промышленной линии по обогащению глауконитового песка и закупки оборудования.

На рисунках приведены кривые распределения частиц (анализатор размера частиц

MASTERSIZER 2000) для глауконитового пигмента (рис. 2.) и обогащенного глау-

конита (рис. 3), полученных на опытно-промышленной линии.

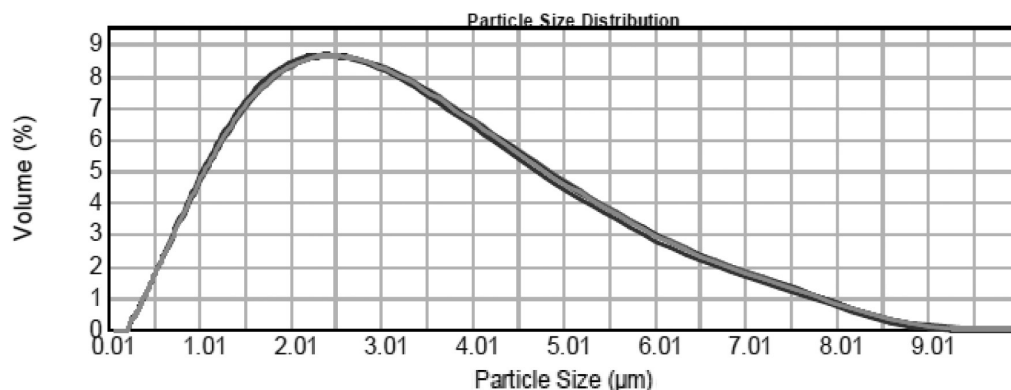


Рис. 2. Распределение по размерам частиц тонкой фракции (глауконитовый пигмент)

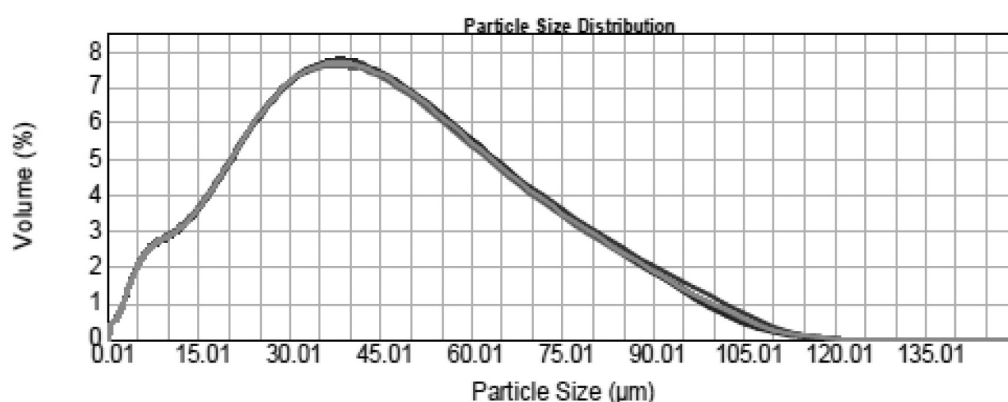


Рис. 3. Распределение частиц по размерам средней фракции (обогащенный глауконит)

Характер приведенных кривых распределения частиц глауконитовых продуктов свидетельствует о достаточном соответствии процесса измельчения и воздушной сепарации предъявляемым техническим требованиям.

Таким образом, разработанные методики исследований и проведенные эксперименты позволили создать опытно – промышленную линию, включающую сушильный агрегат, магнитный сепаратор и комплекс измельчения и воздушной классификации глауконита и наладить выпуск конкурентно-способной продукции из природного глауконитового сырья месторождений Саратовской области.

На введенной в эксплуатацию опытно промышленной линии по разработанной технологии получен ряд материалов из природного глауконитового песка:

- Пигмент для лакокрасочной промышленности;
- Обогащенный глауконит;
- Нейтрализатор нефти и нефтепродуктов;
- Материалы для косметологии и медицины;

- Бытовое чистящее средство экологически безопасное;

- Органоминеральное удобрение;
- Наполнители для кошачьих туалетов;
- Кварцсодержащий материал для структурирования грунта теплиц и рекультивации почвы;
- Активированный мелкодисперсный кварц для строительных смесей, производства строительных материалов и стекловарения.

Разработанная технология получения глауконитового концентрата защищена патентом на изобретение № 2462305, на обогащенный глауконит разработаны Технические условия предприятия.

Планируется создание опытной инновационной линии для производства гранулированных глауконитовых сорбентов, отличительной особенностью которой будет использование химических реагентов и углеродных материалов для модификации продукта, что позволит получить сорбционный материал для очистки питьевой воды, обладающий улучшенными свойствами по отношению к ряду загрязнителей.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИБОРА QEMSCAN ДЛЯ РЕШЕНИЯ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Соцкая О. Т., Горячева Е. М.

СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, sotskaya@neisri.ru

Главной задачей технологической минералогии является получение количественной минералогической информации для того, чтобы определить границы месторождения и распределение полезного компонента в его пределах. Для месторождений золота основными факторами, определяющими выбор технологической схемы, являются форма нахождения золота, его особенности (доля свободного золота, морфология и размеры золотин) и минеральная ассоциация [4].

Целью данной работы явилось изучение методами автоматической минералогии на аппаратно-программном комплексе QEMSCAN минералов из тяжёлой фракции руд месторождений Наталка и Павлик, входящих в Омчакский рудный узел, который находится на юго-западном крыле Аян-Юряхского антиклинория (Северо-Восток России). Изучаемые месторождения сложены пермскими терригенными и вулканогенно-терригенными отложениями и представляют собой кварцевые штокверки, сопровождающиеся вкраплено-сульфидными рудами, локализованными в терригенных углеродсодержащих породах [3]. Эти месторождения относятся к наталкинскому типу золотого оруденения.

Наталкинский тип представляет собой системы тонких золото-кварцевых жил и прожилков в пермских отложениях, сопровождающихся ореолами вкрапленных пирита и арсенопирита. Обширные межжилные пространства представляют собой бедное (около 0,8 г/т) золото-сульфидное вкрапленное оруденение [1, 2].

Аппаратно-программный комплекс QEMSCAN (фирмы FEI) представляет собой сканирующий электронный микроскоп EVO-50 (Carl Zeiss), оснащённый четырьмя энергодисперсионными спектрометрами фирмы Bruker и специальным программным обеспечением, что позволяет автоматизировать систему анализа минерального состава руд. В QEMSCAN происходит аппаратно-программная синхронизация данных, получаемых с BSE-детектора и ЭДС-детекторов. Параллельный анализ сигналов BSE и ЭДС гарантирует качество результатов с точки

зрения достоверности анализа, увеличивает скорость анализа в сравнении с использовавшимися BSE-ориентированными методами. Сбор данных осуществляется независимо от оператора и включает анализ нескольких десятков тысяч частиц, каждая из которых состоит из большого числа информационных точек.

QEMSCAN обеспечивает быстрое определение и количественный анализ минерального и химического состава, размера зёрен и их морфологии для различных типов проб. Формат выводимых результатов настраивается для удобства пользователя. Поскольку система собирает информацию из каждой точки образца, в пользовательском меню заложены широчайшие возможности по формированию различных отчётов – по минеральному составу, по морфологии, минеральным ассоциациям, степени раскрытия полезных минералов и т. д.

В автоматических режимах можно проводить различные виды анализа образцов: Particle Mineral Analysis (PMA) – анализ минеральных частиц, Trace Mineral Search (TMS) – поиск минералов в микроколичествах, Specific Mineral Search (SMS) – анализ заданных фаз, Bulk Mineral Analysis (BMA) – валовой анализ минералов, Frame Scan – покадровое сканирование.

Фирмой-разработчиком QEMSCAN предложен ряд специальных методик подготовки проб и разработана соответствующая аппаратура.

Нами изучены представительные пробы, отобранные одним из авторов во время посещения месторождений Наталка и Павлик в 2011 г. Планировалось изучить минеральный состав проб и особое внимание обратить на изучение всех присутствующих частиц золота. Выбраны виды анализа – PMA и TMS.

Образцы были раздроблены до крупности менее 160 мкм, разделены в бромформе для выделения тяжелой фракции, из которой, по предложенной фирмой методике, были изготовлены шашки. При крупности частиц –0,160 мкм, согласно разработчикам, необходима навеска 0,65 г. Разбавление углеродом 3:1. Толщина

углеродной пленки 20–30 нм. Образцы анализировались при ускоряющем напряжении – 25 kV и токе зонда (в ведёрке Фарадея) – 5 nA.

Результаты представлены в виде числовых файлов данных и графиков, включая количественную минералогию, а также данные по минеральным ассоциациям, распределении частиц

по крупности и степени раскрытия золота (или другого полезного компонента).

Данные количественного минерального состава, полученные на приборе QEMSCAN в режиме анализа минеральных частиц (РМА) показывают, что тяжёлые фракции руд отличаются, прежде всего, составом сульфидов (табл. 1).

Таблица 1

Минеральный состав тяжёлой фракции пробы руд месторождений Наталка и Павлик, масс. %

Минерал	Месторождение Наталка	Месторождение Павлик
Арсенопирит	56,54	19,38
Пирит	35,81	73,58
Пирротин	0,25	1,26
Галенит	0,05	0,03
Сфалерит	0,13	0,11
Кобальтин	0,02	–
Халькопирит	0,01	0,03
Кварц	1,62	0,98
Альбит	0,44	0,11
Калиевый полевой шпат	0,40	0,81
Мусковит/Серицит	0,30	2,28
Доломит	0,38	0,16
Силикаты*	0,08	0,06
Каолинит	0,04	–

Минерал	Месторождение Наталка	Месторождение Павлик
Биотит	0,03	0,03
Амфиболы (роговая обманка)	0,02	0,01
Хлорит	0,01	–
Апатит	2,52	0,05
Рутил	0,30	0,49
Монацит	–	0,01
Лимонит	0,03	0,02
Гётит	–	0,03
Скородит	–	0,01
Золото	0,03	зн,
Комплекс Ag–сульфидов	–	ед,з,
НiBSE*	0,02	0,01
Прочие	0,98	0,53
Итого:	100,01	99,98

*Примечание. Группа «силикаты» включает в себя редкие минералы: гранат, циркон, волластонит, турмалин, эпидот, тальк и сфен. НiBSE – фазы с высоким значением сигнала BSE (обратного рассеяния), которые возникают, как правило, из-за краевых и граничных эффектов.

На месторождении Наталка в сульфидах присутствуют арсенопирит (преобладает) и пирит, гораздо реже встречаются пирротин, галенит, сфалерит, кобальтин и халькопирит; на месторождении Павлик в сульфидах резко преобладает пирит, а арсенопирит имеет подчинённое значение, реже присутствуют пирротин, галенит, сфалерит и халькопирит. В составе руд месторождения Павлик заметны калиевые минералы, а руды Наталки обогащены апатитом. В тяжёлой фракции пробы руд Наталкинского месторождения золото присутствует в количестве 0,03 % (табл. 1) и имеет размер зёрен 10–20 мкм, реже 30–40 мкм (рис. 1). Золото находится в сростках, в основном с арсенопиритом, реже с пиритом, пирротинном, сфалеритом, халькопиритом, кварцем, альбитом, калиевым полевым шпатом.

На диаграммах видно, что степень раскрытия зёрен золота при данной пробоподготовке невысока. Основная масса зёрен золота (54,76 %) из

минералов тяжёлой фракции пробы руд месторождения Наталка раскрыта всего на 10 %. Количество зёрен, раскрытых на 20 % составляет 1,40 %; на 30 % раскрыто 34,63 % зёрен; на 40 % раскрыто всего 0,82 % зёрен; на 50 % раскрыто 6,96 % зёрен и на 60 % раскрыто всего 1,43 % зёрен (рис. 2а).

В тяжёлой фракции пробы руд месторождения Павлик выявлены знаки золота (табл. 1) размером 10–20 мкм, редко 30 мкм (рис. 1). Золото находится в сростках с арсенопиритом, реже с галенитом, халькопиритом и комплексом Ag-сульфидов. Основная масса частиц золота (96,70 %) раскрыта всего на 10 %; на 20 % раскрыто 3,30 % частиц (см. рис. 2б).

Таким образом, используя аппаратно-программный комплекс QEMSCAN, даже на стадии предварительного изучения руд можно получить полезную информацию по их минералогической характеристике.

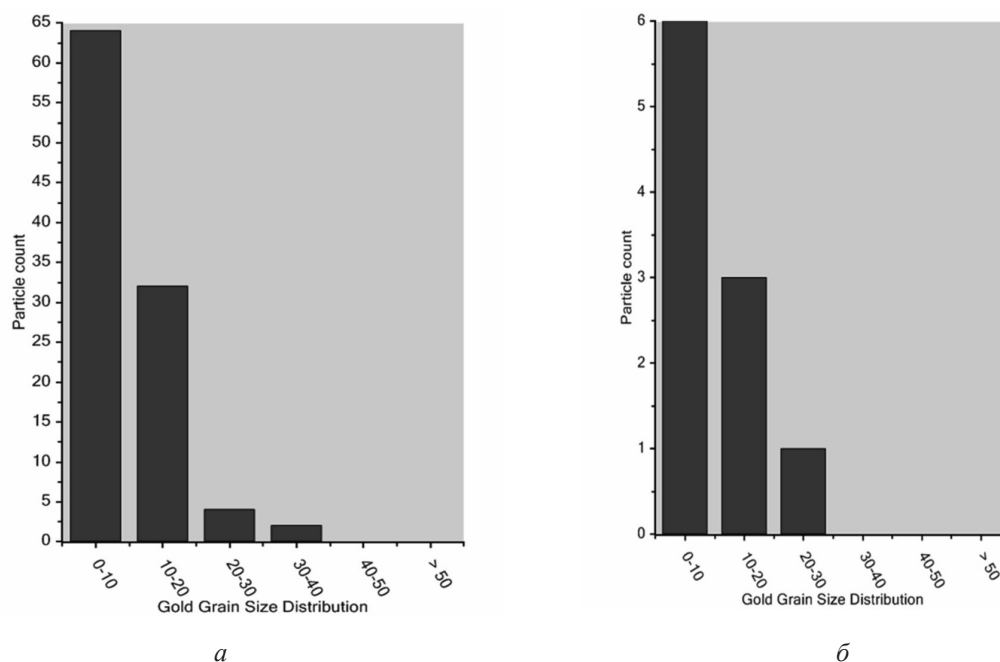


Рис. 1. Графики распределения зёрен золота по размеру из минералов тяжёлой фракции пробы руд месторождения Наталка (а) и Павлик (б). По оси абсцисс – размер зёрен в мкм по оси ординат – количество зёрен

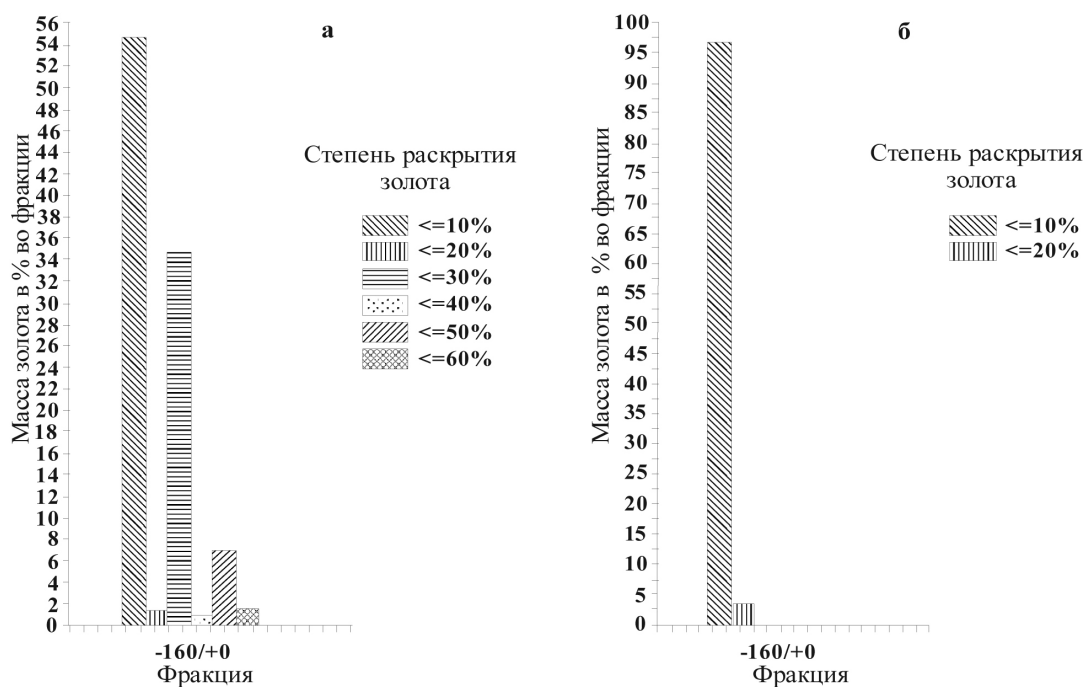


Рис. 2. Степень раскрытия зёрен золота из минералов тяжёлой фракции пробы руд месторождения Наталка (а) и Павлик (б)

В результате автоматического анализа установлено, что основными минералами, содержащими золото, на месторождении Наталка являются арсенопирит, реже пирит, а на месторождении Павлик – арсенопирит, реже халькопирит. Для золота характерны тонкие классы крупности и степень его раскрытия при данной пробоподготовке невы-

сокая – на Наталкинском месторождении на 30 % раскрыто 34,63 % зёрен, на 50 % раскрыто 6,96 % зёрен; на месторождении Павлик основная масса зёрен золота – 96,70 % – раскрыта всего на 10 %. Для более полного извлечения золота необходимо провести доизмельчение, т. к. при крупности менее 160 мкм степень раскрытия низкая.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буряк В. А., Горячев Н. А., Сидоров В. А. и др. Основные литостратиграфические уровни юго-востока Яно-Колымского золотоносного пояса, благоприятные для локализации оруденения // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий. Билибинские чтения. Том 2. Металлогения. Магадан. СВКНИИ ДВО РАН. 2001. С. 143–145.
2. Гаштольд В. В. Геолого-структурные особенности локализации золотого оруденения Наталкинского типа и его геолого-экономическая оценка на примере месторождений Омчакского рудного узла // Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Магадан. 2005. 29 с.
3. Гончаров В. И., Ворошин С. В., Сидоров В. А. Наталкинское золоторудное месторождение. Магадан. СВКНИИ ДВО РАН. 2002. 250 с.
4. Изюитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд // Санкт-Петербург: «Наука». 1997. 582 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИБОРА QEMSCAN ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ «НАТАЛКА»

Никитенко Е. М.¹, Соцкая О. Т.²

¹ *ОАО «Рудник имени Матросова», г. Магадан*

² *СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан*

По итогам геологоразведочных работ 2004–2006 гг. Наталкинское месторождение квалифицировано как большеобъемное и рентабельное для открытого способа отработки.

В связи с установленным вертикальным размахом оруденения (около 1000 м) и большими размерами единого рудного тела в плане 5×1 км, в рудах наблюдается заметная природная изменчивость вещественного состава и неравномерность распределения золота в объеме месторождения.

Проведенные ранее исследования [2] характеризуют, в основном, участки рудных тел, пересеченные подземными выработками на глубоких горизонтах. Однако, в связи с предполагаемой отработкой месторождения открытым способом, становятся актуальными вопросы исследования вещественного состава руды и распределения зо-

лота в приповерхностных зонах на участках первой очереди освоения месторождения. Для эффективной переработки руды этих участков с максимальным извлечением золота, важнейшей задачей является получение информации о формах нахождения благородных металлов и их количественная минералогическая оценка. В связи с этим объектом исследований явились гравитационные концентраты, полученные из руды с разных участков месторождения, характеризующие различные типы оруденения.

Концентраты были подготовлены из навесок руды массой 3 кг гравитационным обогащением на центробежно-вибрационном концентраторе марки ЦВК-100–2М по схеме, приведенной на рис. 1, «вмонтированы» в шашки из эпоксидной смолы и отполированы.

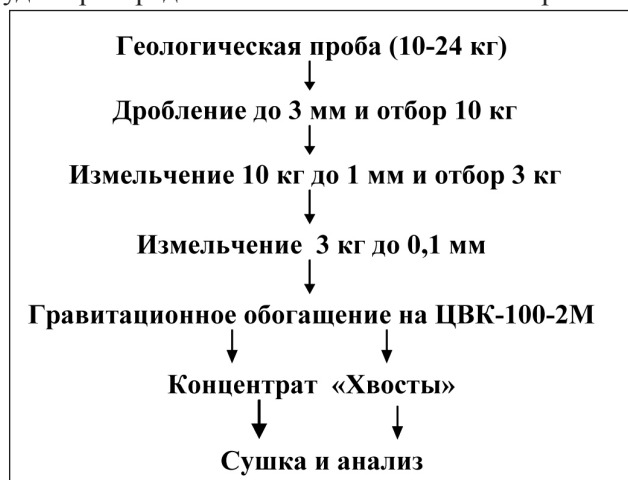


Рис. 1. Схема подготовки гравитационных концентратов

Исследования проводились автоматическим методом [1] на аппаратно-программном комплексе QEMSCAN (FEI) на основе SEM EVO-50 (Carl Zeiss).

Для изучения состава отдельных частиц использовалась система количественного анализа QUANTAX (Bruker), входящая в состав комплекса. Автоматизированная система QEMSCAN обеспечивает быстрое получение количественных статистически достоверных, воспроизводимых минералогических параметров: относительное содержание минерала, площадь поверхности частиц и минералов, минеральные ассоциации, крупность минеральных зёрен, крупность частиц и степень раскрытия минералов, в т. ч. золота. Исследования проводились в режимах анализа минеральных частиц (РМА) с отображением отдельных минеральных частиц и определения следов минералов методом обратного рассеивания (ТМС), когда отображаются только частицы, содержащие определенные фазы. Условия проведения измерений: ускоряющее напряжение 25 кВ, ток в ведёрке Фарадея – 5 нА.

Всего было исследовано 3 гравитационных концентрата. Концентраты № 1 и № 2 характеризуют прожилково-вкрапленную руду, содержащую 1–3 % сульфидов, с Центрального участка

месторождения на глубине в интервале 12–15 м. Концентрат № 3 характеризует вкрапленную руду, содержащую ~ 3 % сульфидов, с Юго-Восточного участка на глубине 250 м в кваршлагге 11 (интервал 122,6–125,6 м).

Результаты количественного минералогического анализа гравитационных концентратов приведены в таблице 1. Как видно, концентраты отличаются по составу и по количеству сульфидов. Состав концентратов с Центрального участка (№ 1 и № 2) отличается от состава концентрата № 3 с Юго-Восточного участка. В свою очередь, концентрат № 1 отличается от состава концентрата № 2 по количеству сульфидов. Во всех концентратах арсенопирит является главным рудным минералом, пирит находится в подчиненном количестве. Доля остальных сульфидов не превышает 1 %, за исключением галенита в концентрате № 1 с Центрального участка. Золото в концентратах находится, в основном, в свободной форме в виде относительно крупных частиц, свободных от сульфидных минералов, в количестве до 7 % (концентрат №1), и в тесной ассоциации с сульфидами. Частицы золота в свободном состоянии, как правило, имеют неправильную форму, величина зёрен достигает 200 мкм (рис. 2).

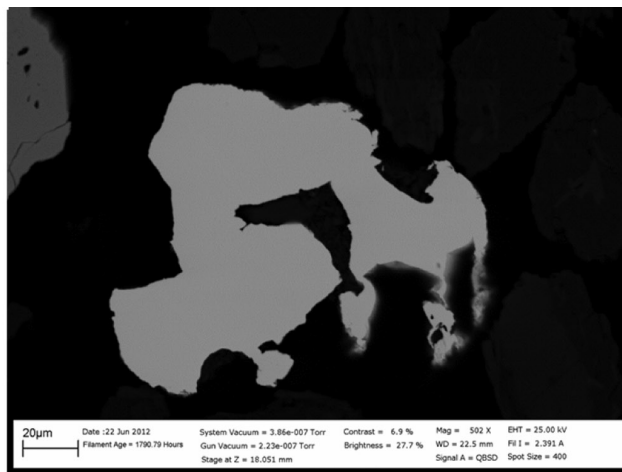


Рис. 2. Свободное самородное Au неправильной формы величиной более 0,2 мм. Электронно-микроскопическое изображение в режиме обратно-рассеянных электронов

Содержание изоморфной примеси серебра в золоте колеблется от 16 до 19 %. Микровключения золота в сульфидах составляют подчинённое количество.

При крупности частиц 0,125 мм, до 40 % золота находится в свободном (раскрытом) состоянии, остальное в виде сростков или включений ассоциирует с другими минералами. В ассоциа-

ции с арсенопиритом и пиритом находится около 10,5 % золота, ассоциативная связь с галенитом составляет не более 2 %, с кварцем около 3 %, с породообразующими минералами – 3,5 %.

В концентрате №1 с Центрального участка присутствует большое количество шламообразующих минералов ~31 % (см. табл. 1) что, вероятно, связано с поверхностным выветривани-

ем рудного вещества, и может отрицательно сказаться на извлечении золота при последующем цианировании подобных продуктов.

Таблица 1

Минералогический состав гравитационных концентратов Наталкинского месторождения, масс. %

Минерал	концентрат № 1	концентрат № 2	концентрат № 3
Золото/электрум	6,86	0,90	0,23
Арсенопирит	24,65	75,38	92,49
Пирит	5,17	9,45	2,09
Галенит	2,41	0,18	0,06
Кобальтин	0,65	—	—
Сфалерит	—	0,10	0,08
Халькопирит	—	0,14	0,06
Лимонит	0,55	0,15	0,17
Гояцит	—	0,04	0,08
Магнетит	—	—	0,04
Монацит	0,15	0,05	—
Гранат	0,22	0,09	—
Рутил/анатаз	2,95	0,59	0,31
Циркон	0,57	—	—
Барит	0,46	0,08	0,05
Апатит	0,72	0,05	0,05
Биотит	3,58	0,39	0,29
Мусковит	3,07	0,59	—
Кальцит	3,37	0,07	—
Пироксен	0,68	—	—
Амфибол	0,50	0,22	—
Альбит	9,88	2,36	0,29
Калишпат	8,39	1,84	—
Кварц	17,13	2,25	0,23
Другие	8,05	5,09	3,48
Итого:	100,00	100,00	100,00

Рассеянное золото заполняет микротрещины и дефекты в сульфидах, размер микровключений колеблется от 0,3 до 15 мкм, пробыность Au варьирует от 820 до 850 %. Микровключения Au в виде сростков присутствуют в арсенопирите, мышьяковистом пирите, наследуя форму трещин и пустот (рис. 3).

Впервые в рудах Наталкинского месторождения в гравитационном концентрате с Центрального участка обнаружен теллурид серебра – гессит Ag_2Te . Размер зёрен варьирует от 2 до 59 мкм, форма зёрен овальная и изометричная (рис. 4). Состав гессита близок к теоретическому: Ag – 62,4 %; Te – 36,8 % .

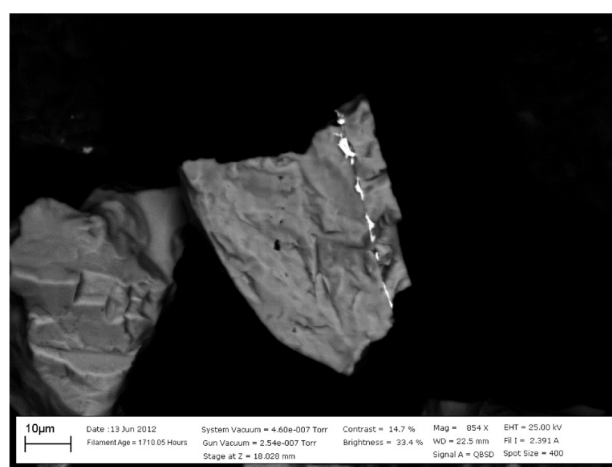
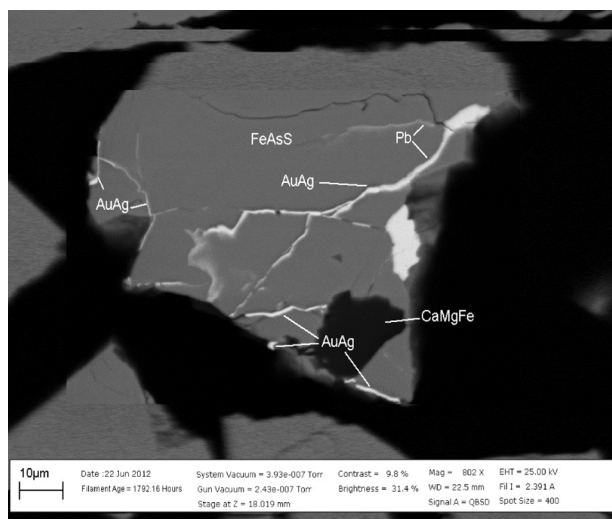


Рис. 3. Золото в арсенопирите в виде сростков и микровключений величиной 5–10 мкм. Электронно-микроскопическое изображение в режиме обратно-рассеянных электронов

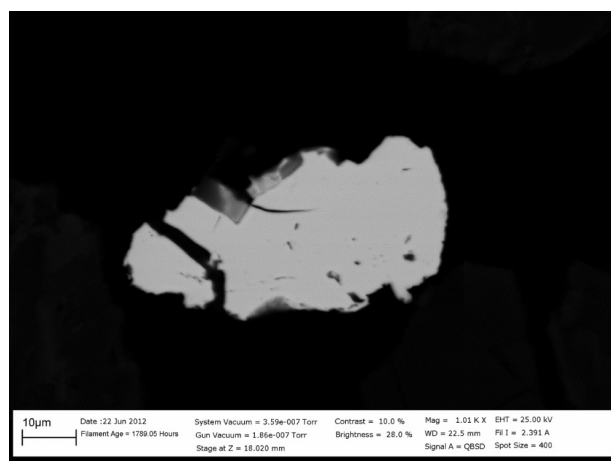


Рис. 4. Частица гессита величиной 59 мкм из гравитационного концентрата №1 с Центрального участка. Электронно-микроскопическое изображение в режиме обратно-рассеянных электронов

В концентрате №1 с Центрального участка месторождения в количестве 0,65 % присутству-

ет кобальтин в виде зёрен изометричного облика размером от 20 до 35 мкм (рис. 5).

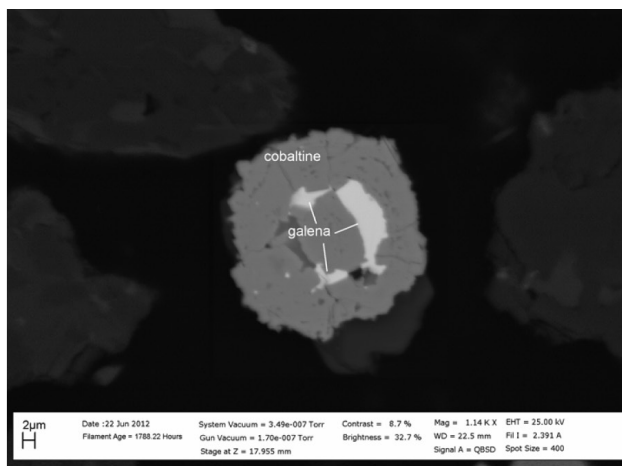
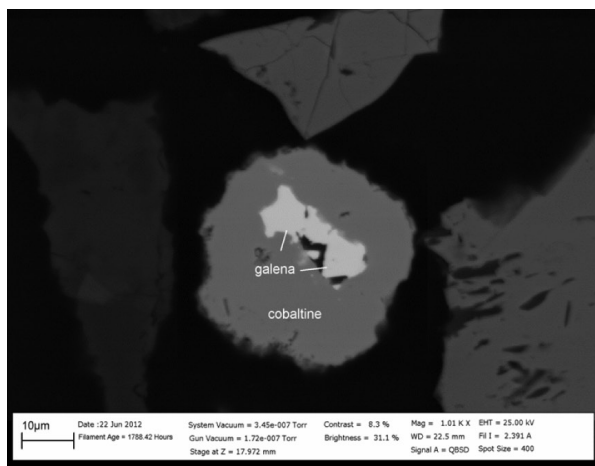


Рис. 5. Частицы кобальтина величиной 39 мкм из гравитационного концентрата №1 с Центрального участка месторождения. Электронно-микроскопическое изображение в режиме обратно-рассеянных электронов

В составе кобальтина (CoNiFeAsS) постоянно присутствуют примеси никеля (Ni) в количестве 2–5 % и железа (Fe) в количестве 3–5 %.

Кобальтин тесно ассоциирует с галенитом, так, в зёрнах кобальтина практически постоянно присутствуют включения галенита величиной от 0,5 до 10–15 мкм (рис. 5, 6).

Кроме микровключений золота, в арсенопирите часто присутствуют включения сульфидов цветных металлов – меди (Cu), свинца (Pb), цинка (Zn): халькопирит, галенит, сфалерит (рис. 7).

В исследованных концентратах по результатам 400 анализов в составе сульфидной матрицы арсенопирита, пирита, галенита, сфалерита, халькопирита примеси золота и серебра не установлены.

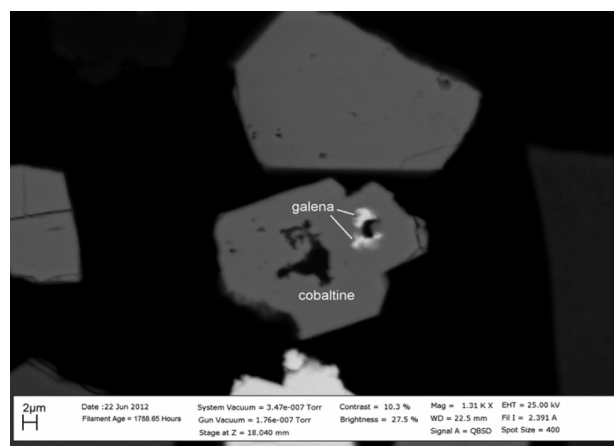


Рис. 6. Зерно кобальтина с микровключениями галенита. Электронно-микроскопическое изображение в режиме обратно-рассеянных электронов

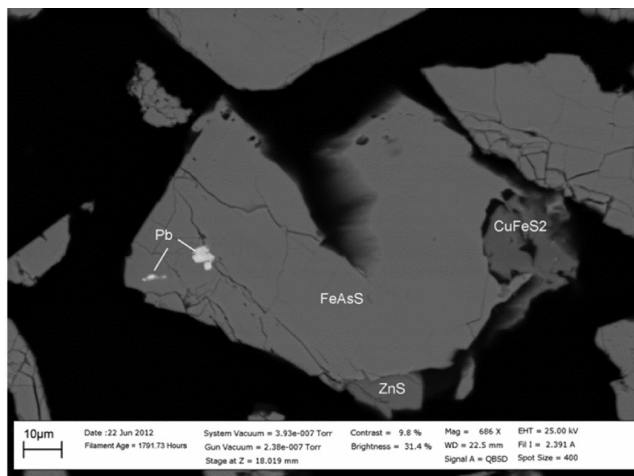
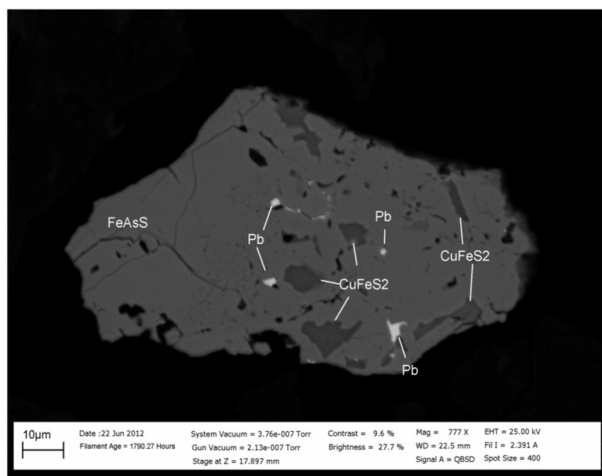


Рис. 7. Микровключения сульфидов цветных металлов (Cu, Pb, Zn) в арсенопирите. Электронно-микроскопическое изображение в режиме обратно-рассеянных электронов

Таким образом, основные результаты, полученные при изучении состава тяжёлых фракций руды в гравитационных концентратах с Центрального и Юго-Восточного участков Наталкинского сводятся к следующему:

1. Главная форма нахождения золота – самородная, причём присутствуют свободные более крупные частицы величиной до 0,25 мм и рассеянное Au в виде микровключений.

2. Основными минералами, вмещающими микровключения рассеянного микроскопического золота, являются арсенопирит, мышьяковистый пирит, в которых золото присутствует в виде самостоятельных фаз и в виде сростков с другими минералами, в основном, сульфидами свинца и меди, реже с сульфидами цинка.

3. Выявлена новая форма нахождения серебра в виде теллурида (гессита) и показано относительно широкое распространение кобальтина.

4. Получена информация о разном минеральном составе концентратов изученных проб и разной ассоциацией в них золота с другими минералами, а также разной степени раскрытия золотосодержащих частиц.

Эти данные показывают, что, применение методов технологической минералогии позволяет получать важную для геологов и технологов оперативную информацию о вещественном составе руды и новых формах полезных компо-

нентов, гранулометрическом составе и распределении золота по участкам, о вещественном составе продуктов обогащения, размерности и степени раскрытия золотосодержащих частиц и их сростков.

В заключение необходимо отметить, что при освоении Наталкинского месторождения целесообразно применение методов технологической минералогии для возможности оперативного контроля и корректировки технологического процесса переработки руды с учётом её состава, оценки извлекаемых и теряемых полезных компонентов в реальном режиме времени, расчёта баланса драгметаллов.

Возникает необходимость применять системные более детальные исследования руды и продуктов её переработки современными методами для выявления попутных полезных минеральных фаз, в первую очередь, платиноидов, которые, возможно, входят в ассоциацию золото-сульфиды-породообразующие.

Основываясь на результатах, можно сделать предварительный вывод о том, что при переработке руды Наталкинского месторождения следует отдавать предпочтение гравитационным способам обогащения со стадийным выводом свободного золота, выводом шламовых минералов, с целесообразным сокращением объёмов на переделе флотационного обогащения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башлыкова Т. В., Пахомова Г. А., Лагов Б. С. и др. Технологические аспекты рационального недропользования: Роль технологической оценки в развитии и управлении минерально-сырьевой базой страны. М.: МИСИС, 2005. 576 с.

2. Гончаров В. И., Ворошин С. В., Сидоров В. А. Наталкинское золоторудное месторождение. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 250 с.

3. Горячев Н. А. Золоторудообразующие системы орогенных поясов // Вестник СВНЦ ДВО РАН, 2006, № 1. С. 2–16

О ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ОБОГАТИМОСТИ РУД ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Алёхин А. А., Горбунова Е. В., Петухова Д. Б., Чертов А. Н.

НИИ ИТМО, г. Санкт-Петербург, a.n.chertov@mail.ru

Оптический метод сепарации (в России известен как «фотометрический», в зарубежной практике – «color sorting») является наиболее универсальным из радиометрических и широко при-

меняется при обогащении минерального сырья, сортировке твердых бытовых и промышленных отходов, отходов металлургического передела, сельскохозяйственных культур.

В горнодобывающей промышленности оптический метод успешно используется при добыче золота [4, 6, 13], алмазов [5, 9, 11], никеля [8], кальцитов [10], полевых шпатов [12] и других твердых полезных ископаемых.

Данная технология обогащения является одной из наиболее динамично развивающихся, однако в отечественной практике, за исключением отдельных работ, отсутствуют даже публикации, посвященные особенностям и возможностям методов цветового анализа твердых полезных ископаемых и реализующему их оборудованию.

На рынке обогатительного оборудования в настоящее время наиболее широко представлены оптические сортировщики немецких фирм LIUD GmbH (сепараторы Optosort), Mogensen GmbH (сепараторы MikroSort), «CommoDas GmbH – UltraSort» и др., которые, по заявлениям их производителей, используют современные видеотехнологии и помехоустойчивые алгоритмы контроля цветовых характеристик 3D-объектов и являются адаптивными к особенностям обрабатываемого материала.

В действительности, результаты анализа, полученные на подобном «интеллектуальном» оборудовании, с точки зрения решения задач, связанных с цветом и, так или иначе, имитацией визуального аппарата человека, анализом цветовой картины, нельзя считать объективными. Это обусловлено тем, что осуществляется не собственно анализ цвета минералов как присущих им характеристик, а измерение некоторых «цветовых координат» их изображений в выбранной модели цвета.

Например, известно [2], что в сепараторах Optosort в качестве базовой цветовой модели используется «родная» для видеоаппаратуры система RGB, не являющаяся, в силу своей неравномерности, объективной с точки зрения анализа цвета [7].

То же самое можно сказать и о сепараторах Commodas, использующих систему Yuv [3], аналог цветовой модели CIE Luv (производной от RGB), также отличающуюся неравномерностью представления цвета [1].

Используемый подход в ряде случаев позволяет подобрать приемлемое аппаратное решение: как правило, при разделении по критериям «темный / светлый», нескольким основным цветам или же по однородности одного из цветов. Однако, наряду с отступлением при про-

ектировании схем регистрации оптических сепараторов от законов воспроизведения цвета, указанное обстоятельство является причиной сложности, если отсутствует возможность на данном этапе установить точные цветовые пороги и допуски при настройке данного типа обогатительного оборудования, оценить малые цветовые различия между компонентами в исследуемом материале и, в конечном итоге, его обогатимости. Как результат, оптический метод нередко оказывается несостоятельным при анализе «сложного», слабоконтрастного материала.

Кроме того, до сих пор не существует критериев, на основании которых возможно осуществлять хотя бы предварительный выбор в пользу того или иного производителя обогатительного оборудования данного типа без проведения полупромышленных испытаний, а только по результатам сравнения эффективности использования различных цветовых моделей и схем измерения при обогащении конкретного типа руды.

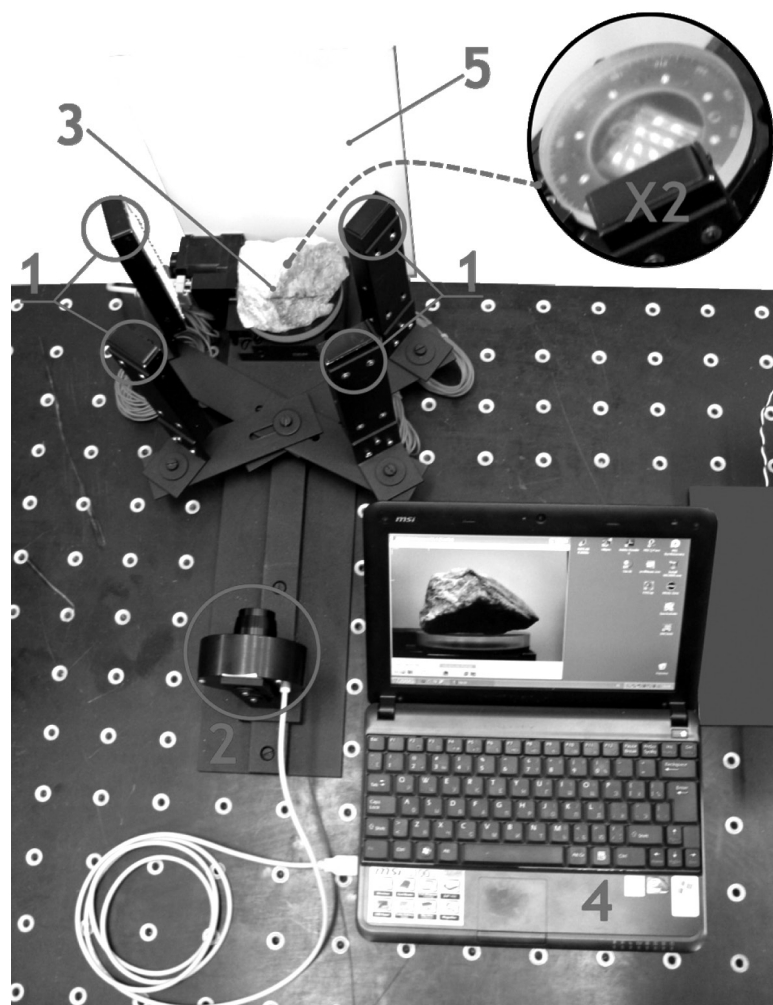
В силу всего вышесказанного, метод оптической сепарации на сегодняшнем уровне своего развития не является «прозрачным», понятным для потенциального пользователя. Его эффективность (даже при использовании существующего обогатительного оборудования) занижена, а границы применимости в области обогащения твердых полезных ископаемых очень сильно сужаются.

Коллективом кафедры оптико-электронных приборов и систем Национального университета информационных технологий механики и оптики (г. Санкт-Петербург) ведутся исследования с целью устранения указанных недостатков оптического метода обогащения и его дальнейшего развития. И одним из ключевых моментов, по мнению авторов статьи, является разработка подходов к предварительной оценке обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом и соответствующего аналитического оборудования.

На рисунке 1 представлен макет оптико-электронного аппаратно-программного комплекса (АПК) для оценки степени обогатимости минеральных образцов оптическим методом.

Адаптивная схема построения позволяет подбирать оптимальные условия анализа (рабочее расстояние, параметры подсветки, цвет фона) для различных минеральных образцов в диапазоне крупности –150+5 мм.

Рис. 1. Макет разработанной оптико-электронной системы для исследований минеральных образцов оптическим методом: 1 – источники света; 2 – узел регистрации образца; 3 – объект анализа; 4 – персональный компьютер со специализированным программным обеспечением; 5 – сменный фон; X2 – моторизованная круговая платформа с подсветкой снизу (опционально)



Разработанное программное обеспечение включает предварительный этап цветокоррекции и 2 режима измерений. На первом этапе (в режиме «Диагностика») оператор вручную на изображениях минеральных объектов контрольной группы (10–20 образцов) указывает степень их полезности («Концентрат», «Промежуточный продукт» или «Хвосты») и отмечает характеристические цветовые области, по которым АПК рассчитывает цветовые пороги различения (рис. 2).

На втором этапе (в режиме «Проверка») АПК автоматически анализирует предъявляемые ему образцы с оценкой степени их полезности, с итоговым расчетом порога/порогов разделения.

Анализ осуществляется параллельно в трёх цветовых моделях: RGB, Yuv и HLS. Таким образом, также определяется и цветовая модель, оптимальная для обогащения каждого конкретного типа руды.

В качестве примера, иллюстрирующего процесс анализа минеральных образцов с помощью представленного макета, ниже приведены результаты исследований образцов золотосодержащей

руды месторождения «Коневинское» (предоставленные ОАО «НПП ГеоТестСервис»).

Руды указанного месторождения относятся к убогому сульфидно-кварцевому типу. Вмещающие породы представлены неизменными биотит-роговообманковыми гранодиоритами и монцогранодиоритами, лейкократовыми гранитами, а также дайками различного состава. В состав рудных тел, согласно существующим кондициям, включаются кварцевые жилы и прожилки, а также рудные березиты, отличающиеся от остальных метасоматитов повышенным содержанием золота (от 1,0 г/т и более) и сульфидов. При этом вмещающие породы (гранодиориты) и рудный материал (березиты, кварц) имеют близкие оптические характеристики.

Во всех системах цветовых координат производился поиск диапазонов координат, характеризующих четыре основных оттенка изображений: «коричневых», определяющих окислы березитов; «светлых», характеризующих наличие кварцевых включений; «болотно-зеленых», свидетельствующих о присутствии березитов; «серых», определяющих вмещающие гранодиориты.

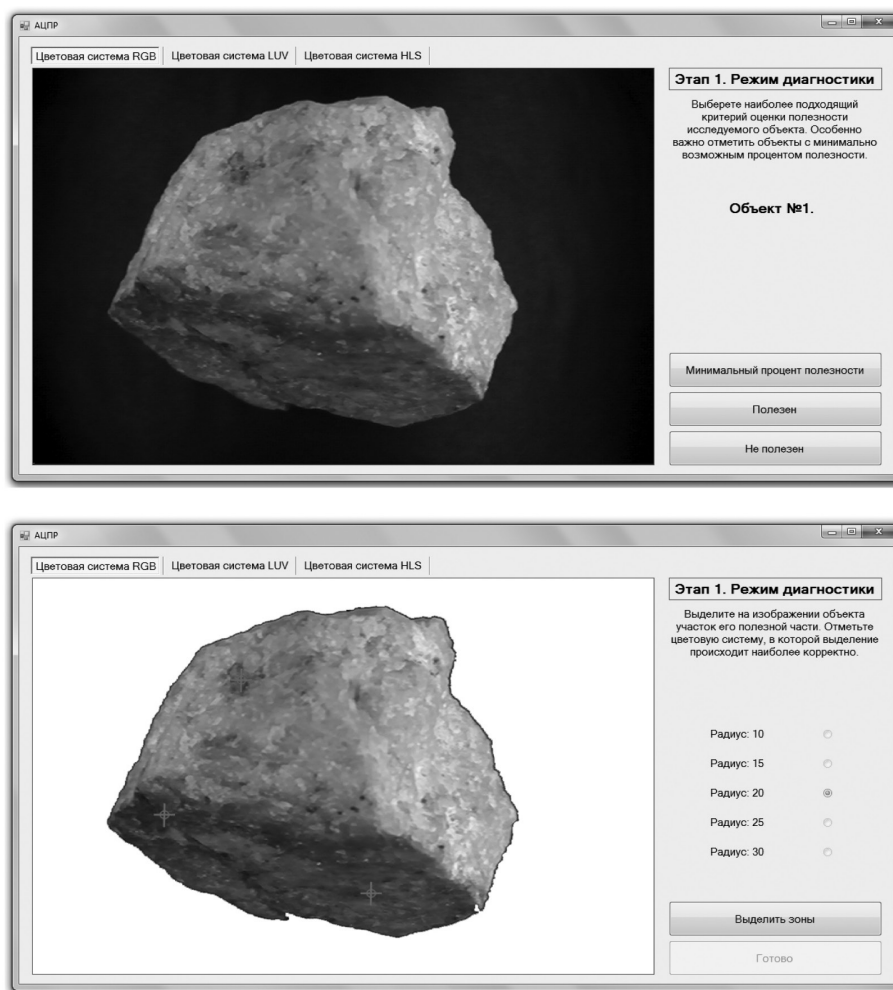


Рис. 2. Пользовательский интерфейс программного обеспечения АПК

При этом под «серыми» оттенками подразумевались те цветовые оттенки, которые не вошли в остальные группы («коричневые», «светлые», «зеленые»).

Ниже в таблице приведены результаты анализа, полученные с помощью АПК, а также результаты, полученные на сепараторе Commodas.

Таблица

Результаты анализа наиболее характерных образцов руды месторождения «Коневинское» (кварц, окисленный березит, березит, гранодиорит) при различных величинах порога разделения

Образец	Система цветовых координат	Пороги разделения АПК, %					Пороги разделения сепаратора Commodas, %				
		60	70	75	80	90	60	70	75	80	90
Кварц	RGB	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
	Yuv	0	0	0	1	1					
	HLS	0	0	1	1	1					
Окисленный березит	RGB	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Yuv	1	1	1	1	1					
	HLS	1	1	1	1	1					
Березит	RGB	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
	Yuv	0	0	1	1	1					
	HLS	1	1	1	1	1					
Гранодиорит	RGB	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Yuv	0	0	0	0	0					
	HLS	0	0	0	0	1					

Как видно из представленных результатов, порог в 75–80 % позволяет эффективно отделить полезные кварц, окисленный и простой березиты от гранодиоритов в Yuv и HLS системах цветовых координат. Этот же порог для RGB системы цветовых координат составляет 90 %.

Сравнение результатов анализа пробы, полученных на сепараторе Commodas (работающим в системе Yuv) и с помощью АПК для той же системы цветовых координат, показало высокую степень их совпадения.

Таким образом, подтверждена возможность реализации аналитического оборудования, обеспечивающего оценку обогатимости руд оптическим методом без прямого опробования на существующих сепараторах.

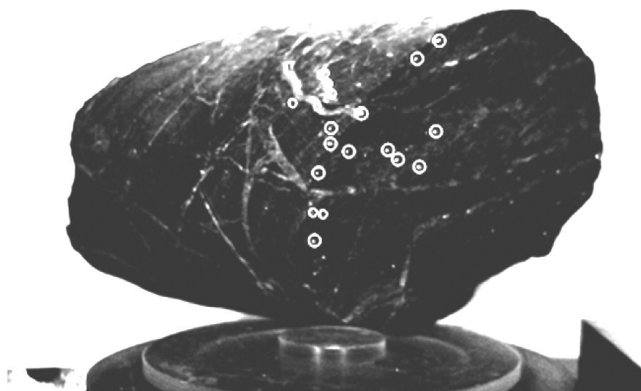
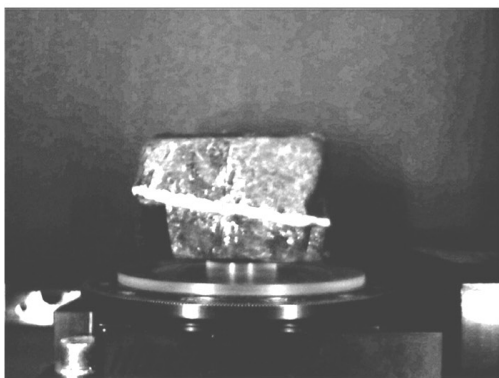


Рис. 3. Образцы золотосодержащей руды месторождения «Павлик»

Селективными признаками наличия золота в руде данного месторождения являются не зоны определенной цветности, а кварцевые прожилки и сульфидные блёстки на поверхности. Поэтому оптический метод в его сегодняшнем виде не способен обеспечить эффективное обогащение

Полученные результаты позволяют приступить к созданию опытного образца аналитического опико-электронного комплекса, который может использоваться в технологических лабораториях при геологических партиях для оценки обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом и на горно-обогатительных предприятиях с целью облегчения оптимизации процесса настройки оптических сортировочных комплексов под особенности конкретных видов руд.

Кроме того, необходимо отметить, что возможности оптического метода не исчерпываются анализом цветовых характеристик минеральных образцов. В качестве примера на рис. 3 приведены фотографии образцов золотосодержащих руд месторождения «Павлик» (Магаданская область).

такой руды. Однако в связи с тем, что оптический метод основан на принципах обработки и анализа изображений, теоретически возможно усовершенствовать его за счёт использования дополнительных (не цветовых) селективных признаков, тем самым расширив его возможности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов Е. А. Цветоведение: учеб. пособие для вузов. М.: Легпромбытиздат, 1987. 65 с.
2. Кобзев А. С., Брылов Д. С., Пичугин А. Н., Тихвинский А. В. Применение фотометрической сортировки при переработке промышленных и бытовых отходов // Экологические проблемы индустриальных мегаполисов. Труды IV международной научно-практической конференции, Москва, 2007.
3. Кобзев А. С., Ольховский А. М., Банщиков Е. А., Шилкин А. Н., Толмачев Г. Ф. Проведение испытаний предварительного обогащения золотосодержащих руд месторождения «Коневинское» фотометрическим методом сепарации на промышленных сепараторах COMMODAS // Материалы Всероссийской

научно-практической конференции «Новые и нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых Прибайкалья и Забайкалья», Улан-Удэ, 10–12 ноября 2010 г.

4. Никулин А. И., Романчук А. И., Павлова Н. Н. и др. Технология переработки золотосодержащих руд месторождения Сухой Лог с предварительной крупнукосковой фотометрической сепарацией // Руды и металлы, 2009. № 2. С. 68–77.

5. Обзор алмазодобывающей отрасли России // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.advisers.ru/file/advisers/almaz.pdf>.

6. Рябкин В. К., Литвинцев Э. Г., Тихвинский А. В., Карпенко И. А., Пичугин А. Н., Кобзев А. С.

Полихромная фотометрическая сепарация золотосодержащих руд // Горный Журнал, 2007. № 12. С. 88–93.

7. Юстова Е. Н. Цветовые измерения (Колориметрия). СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2000. 397 с.

5. Dehler M. Optical Sorting of Ceramic Raw Materials / Wedel, Germany, Tile & Brick Internat, Volume 19 (2003).

9. Gem (GEM) Series sorting equipment of Commodas Ultrasort // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.commodas-ultrasort.com/ore-sorting-equipment-gem-series-11657>.

10. Harbeck H. Optoelectronic Separation in Feldspar Processing at Maffei Sarda / Germany, Aufbereitungs Technik, 42 (2001) № 9.

6. New trends in optical sorting // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.samcode.co.za/downloads/MiningInAfrica/OpticalSorting.pdf>.

12. Tako P. R. de Jong. The Economic Potential of Automatic Rock Sorting / The Netherlands, Delft University of Technology, Department of Geotechnology, 2005.

13. Von Ketelhodt, L. Viability of optical sorting of gold waste rock dumps // World Gold Conference 2009, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. P. 271–277.

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ АСФАЛЬТОБЕТОНА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА И СОЧЕТАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО И БИТУМНОГО КОМПОНЕНТОВ

Буртан С. Т., Мустафин С. К.

ООО «Клариса», г. Уфа

Расчет содержания компонентов определяет состав асфальтобетона, себестоимость, технологические свойства асфальтобетонной смеси и физико-механические свойства асфальтобетона, характеризующие эксплуатационные характеристики и стоимость дорожного покрытия.

Общим для известных методов расчета содержания компонентов асфальтобетона является подбор плотного минерального скелета и определение рационального количества битума, при котором физико-механические свойства образцов удовлетворяют требованиям стандарта [9].

Компоненты асфальтобетонной смеси: материал минерального остова (щебень, песок, минеральный порошок) и органические вяжущие (битум нефтяной дорожный, адгезионные добавки).

Из продукта разложения нефти гудрона (остаточного битума) получают более вязкие окисленные битумы, или применяют их без переработки. Лучший гудрон получают из тяжелой смолистой нефти, где он составляет 7–8 мас. %. Дисперсионная среда битума как коллоидной системы – раствор смол в маслах, дисперсная фаза – асфальтены, карбены и карбоиды. Масла придают битуму подвижность и текучесть, смолы (20–40 мас. %) – ластичность и водостойкость. Хорошую адгезию битума к каменным материалам обеспечивают полярные сернистые, азотистые и кислородные соединения углеводородов смол. Вязкость и теплостойкость битума определяют количества и дисперсность асфальтенов, составля-

ющие 10–40 мас. %. Неокисленные битумы состоят на 85–86 % из коллоидных образований с частицами размером 9–10 Å; а содержание более крупных коллоидных частиц размерами 405–415 Å не превышает 12–13 %. В окисленных битумах преобладают (69–70 %) частицы размерами до 440 Å, а частицы размерами до 16 Å составляют 30–31 %.

Технология производства битумов определяется составом исходной нефти. Для нефтей с содержанием общей серы более 1 масс. % и нефтей малосернистых и малопарафинистых (твердых парафинов менее 1 масс. %) гудрон получают вакуумной перегонкой мазута (глубина отбора зависит от содержания серы) и последующем окислении гудрона до битума [2,3].

Данные лаборатории «Топлив и реагентов» РГП Института проблем горения Министерства образования и науки Республики Казахстан показали, что наилучшим сырьем для получения дорожных битумов является высоковязкая (150 мм²/с при 50 °С) нефть месторождения Каражанбас. Сырьё позволяет получать битумы и битумные мастики с улучшенными свойствами.

Для повышения трещиностойкости асфальтобетона в битум вводятся добавки полимеров, а для улучшения прилипания битума к поверхности зерен минерального материала – поверхностно-активные вещества (ПАВ).

ООО «Клариса» проводит комплексные исследования компонентов асфальтобетона – щеб-

ня слагающего минеральный остов минерального порошка, битума и адгезионной присадки для модификации вяжущего с целью создания предпосылок для управления качеством асфальтобетона и прогнозирования его состояния на всех стадиях жизненного цикла [1].

Минеральный порошок чаще получают из известняка и доломита, реже доменного шлака, пылеуноса цементных заводов и зол тепловых станций.

Размер зерен порошка менее 1,25 мм, частиц до 0,071 мм не менее 70 %; пористость не более 35 об. %; коэффициент водостойкости смеси порошка и битума не ниже 0,7–0,8. Без мине-

рального порошка асфальтобетон быстро разрушается по причине пористости [5].

Дробленные пески 0–5 мм введенные в асфальтобетонную смесь повышают сдвигоустойчивость и фрикционные характеристики дорожного покрытия. Смесь дробленного песка с природным окатанным песком в пропорции 1:1 или 2:1 улучшает подвижность битумо-минеральной смеси и физико-механических свойств асфальтобетона [4].

Щебень для создания минерального остова асфальтобетона применяют прочный и морозостойкий из горных пород магматического, осадочного и метаморфического происхождения, реже шлаков [6].

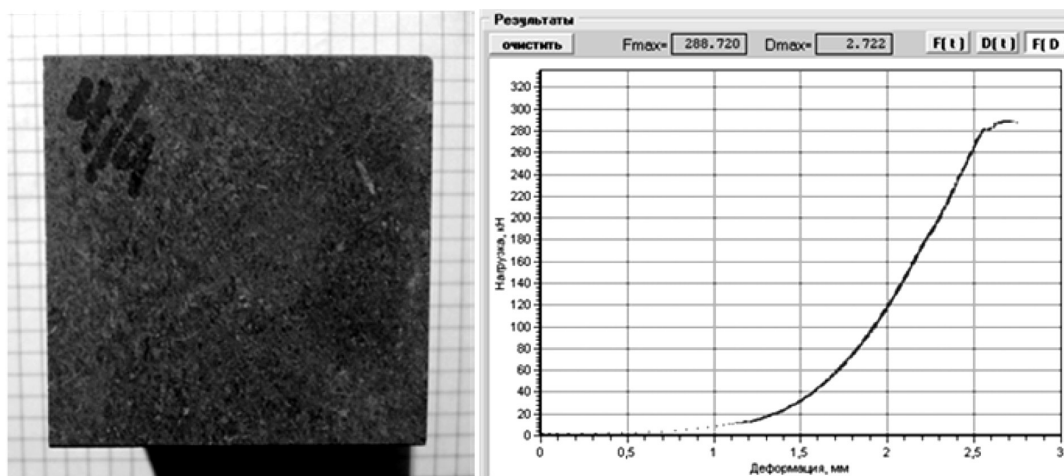


Рис. 1. Результаты испытания габбро-диабазы Круторожинского месторождения на предел прочности при сжатии по ГОСТ 2801–98: а – образец диабазы до испытания; б – график результатов испытания

Щебень имеет сложную полиминеральную структуру (рис. 2) поэтому на поверхности зёрен образуются зоны мозаичного распределения отри-

цательных и положительных зарядов, обуславливающих неоднородность проявления адгезионных свойств битума к различным минералам зёрен.

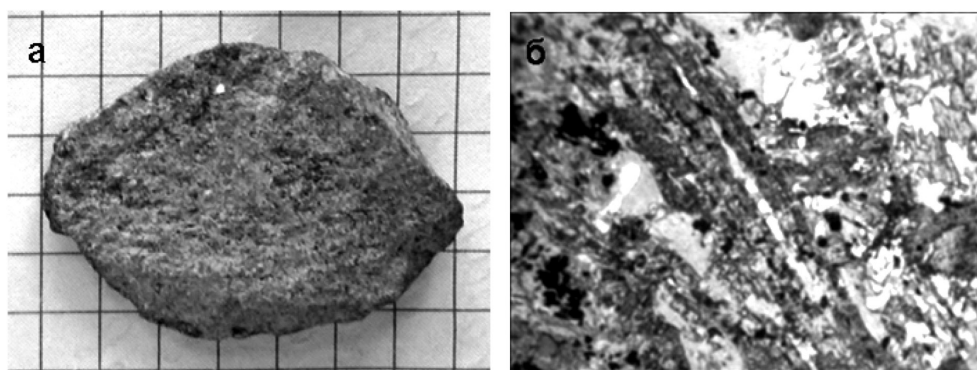


Рис. 2. Неоднородность зёрен щебня из габбро-диабазы Круторожинского месторождения: а – неоднородная поверхность зерна, б – минеральная неоднородность (микрофотография увеличение 100)

Показателями качества щебня для асфальтобетона считаются [7]:

1. зерновой состав;

2. (морфология) форма зёрен;

3. пористость;

4. содержание зёрен слабых пород;

5. истираемость;
6. плотность, пористость, пустотность;
7. водопоглощение;
8. морозостойкость;
9. содержание пылевидных и глинистых частиц;
10. сопротивление удару;
11. электроизоляционные свойства;
12. содержание вредных примесей;
13. содержание естественных радионуклидов.

Битумная пленка копирует рельеф поверхности минеральных зерен в зависимости от породы, величины зерен и уравнивает силы адгезии на границе раздела вяжущее – минеральный материал, силы, обусловленные вязкостью битума, и гравитационные силы.

При формировании битумоминеральной смеси первыми битумом покрываются мелкие зерна минерального порошка, обладающие большей адсорбционной способностью затем более крупные зёрна песка и щебня. Толщина пленок битума на зернах 8–11 мм в углублениях поверхности равна 0,2–0,5 мм для мелкозернистых, и 0,3–1,5 мм для крупнозернистых пород. Для обычных мелкозернистых смесей толщина битумной пленки, составляет 4–6 мкм, а в средне- и крупнозернистых – 12 мкм.

Средняя толщина битумной пленки в асфальтобетонной смеси возрастает с уменьшением содержания минерального порошка. При содержании 20 % порошка в смеси средняя толщина пленки составляла 2,58 мкм; при 15 % – 3,18 мкм; при 10 % – 4,2 мкм и в смеси без порошка – 18 мкм.

Экспериментально доказана невозможность оценки толщины битумной пленки для асфальтобетонных смесей различной зернистости, содержа-

щих различные количества минерального порошка. Модель распределения битума в смеси, основанная на равномерном обволакивании всех минеральных зерен одинаковой по толщине пленкой, нуждается в совершенствовании. На отполированной поверхности кварца битумная пленка при выдерживании в горячей воде превращается в круглые капли размерами 0,03–0,1 мм, а на кальците лишь сморщивается с появлением небольших открытых участков. Плохое сцепление битума с богатыми кремнеземом, и хорошее с бедными кремнеземом породами, справедливо лишь для абсолютно кислых (кварц, кремнь) и абсолютно основных пород (габбро, диабаз, базальт) [11]. При испытании горячей водой на отполированных пластинках из гранита на кристаллах кварца и полевого шпата появились круглые битумные капли размером 0,05–0,1 мм. Адгезия битума к минеральному материалу зависит от степени смачивания, механического сцепления химического взаимодействия.

Перед изготовлением адгезионной битумной присадки специалисты ООО «Клариса» исследуют исходные компоненты проектируемой асфальтобетонной смеси (битумное вяжущее и минеральную часть) и разрабатывают продукт, учитывающий все свойства этих компонентов.

Универсальные присадки от известных производителей чаще не учитывают всех этих обстоятельств и рассчитаны на некий усредненный вариант взаимодействия составляющих дорожной смеси.

Комплексная присадка двойного действия БП-КСП компании «Клариса» позволяет улучшать сцепление битума с минералами основного и кислого характера, составляющими в зёрнах щебня неоднородные агрегаты.

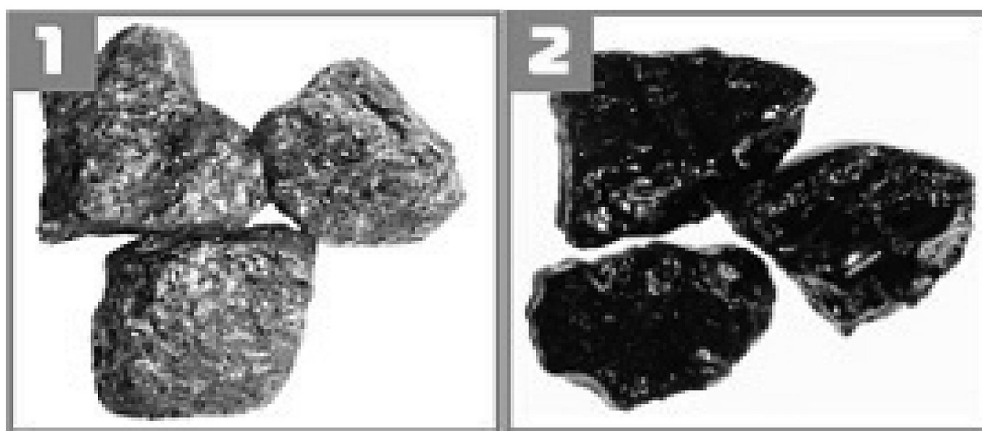


Рис. 3. Результаты испытания по ГОСТ 12801–98 качества сцепления битума с щебнем до введения присадки БП-КСП (1) и после (2). Исходные материалы: щебень габбродиабаз (ЗАО «Карьер Голодай Гора», Республика Карелия), битум БНД 90/130 (ЗАО «Рязанская НПК»)

С использованием адгезионной присадки БП-КСП построены более 300 км федеральной трассы «Амур» (Хабаровск-Чита), добавки разработаны и успешно применяются при создании дорожных покрытий в Республиках Башкортостан, Татарстан, Чувашия, а также в Оренбургской, Курганской, Астраханской, Читинской, Амурской областях и др.

Оптимизации управления качеством асфальтобетона способствует обширная и детальная технологическая информация, характеризующая как каменные минеральные компоненты, так и органические вяжущие. Банк данных, характеризующих технологическое качество минерального сырья позволяет прогнозировать свойства минерального остова асфальтобетона, что актуально для реализации проектов дорожного строительства в регионах нового освоения. Необходим банк технологических параметров нефтяных дорожных битумов и щебня ведущих производителей Российской Федерации, что позволит прогнозировать оптимальные сочетания и вяжущей (битум, модифицированный комплексной адгезионной присадкой) составляющих асфальтобетона, управлять его качеством, минеральной (щебень и минеральный порошок) адаптированным к климатическим, инженерно-геологическим, экологическим и эксплуатационным условиям различных регионов страны.

Обозначенные в данной статье общие принципы управления качеством асфальтобетона основанные на оптимизации состава компонентов и наиболее эффективного сочетания их в составе битумо-минеральных смесей с использованием новых инновационных подходов позволяют осуществлять мониторинг качества на всех стадиях жизненного цикла дорожных одежд, а также могут и должны использоваться при ресайклинге последних.

Примером инновационного подхода к решению проблем дорожного строительства является ресайклинг – передовая технологически целесообразная и экономически привлекательная технология строительства новых и ремонта старых дорог при которой на месте повторно перерабатывается старое дорожное покрытие, состоящее в основном из поверхностных, связующих и несвязанных несущих слоев.

Методы ресайклинга с использованием материала ремонтируемого покрытия: 1) Recycling in plant – с повторным использованием материалов покрытия в стационарной смесительной установке и 2) Recycling in place – повторным использованием покрытия непосредственно на месте (модуль), определяются качеством старого асфальтобетона и эко-

номической целесообразностью. При неудовлетворительном качестве ремонтируемого асфальтобетонного покрытия применяется первый метод, являющийся относительно независимым от погодных условий, но приводящий к возможным потерям материала, нарушениям стабильности в слое износа и выравнивающем слое, нарушению геометрии покрытия, дроблению щебня. Основная операция – фрезерование для удаления дефектного слоя покрытия.

Холодное фрезерование, осуществляемое без нагрева поверхности дорожного покрытия путем механического воздействия приводит лишь к дроблению зерен щебня остова и уменьшению гранулометрического состава.

Горячее фрезерование ослабляет когезионные и адгезионные силы сцепления в асфальтобетонном покрытии, что определяет его эффективность.

Так наши исследования асфальтобетонного гранулята, полученного холодным фрезерованием, показали, что содержание вяжущего (битума дорожного) в 100 % битумо-минеральной смеси равно 6,12 мас. %, а прочность щебня в материале для регенерации соответствует марке М 1000 (рис. 4).

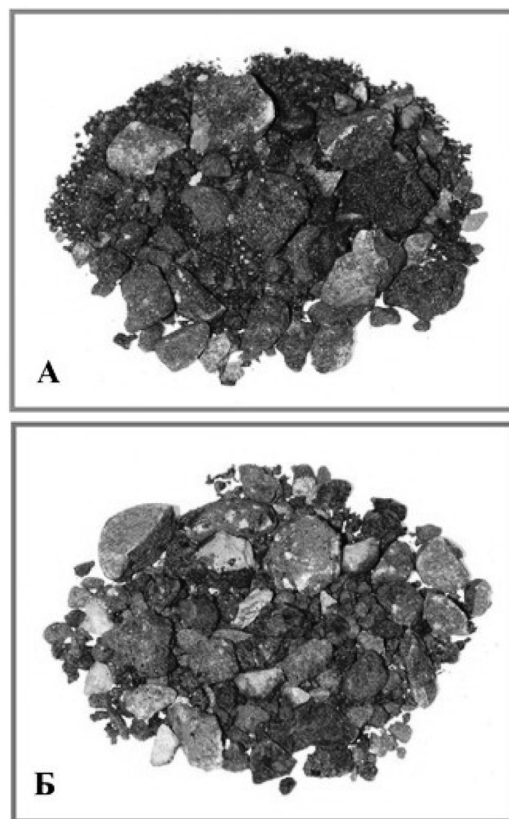


Рис. 4. Результаты испытания асфальтобетонного гранулята на сцепление по ГОСТ12801–98: А – асфальтобетонный гранулят до кипячения; Б – асфальтобетонный гранулят после кипячения

Комплексные исследования гранулята асфальтобетона позволили предложить оптимальную технологию регенерации асфальтобетона (рис. 5) и производства минералоорганической всепогодной смеси. Изучение 6 вариантов регенерации позволило выбрать наиболее оптимальный из них. Рекомендованными к практическому применению особыми условиями технологии приготовления асфальтобетонной и минералоорганической всепогодной смесей являются:

1) влажность асфальтобетонного гранулята не более 1 %;

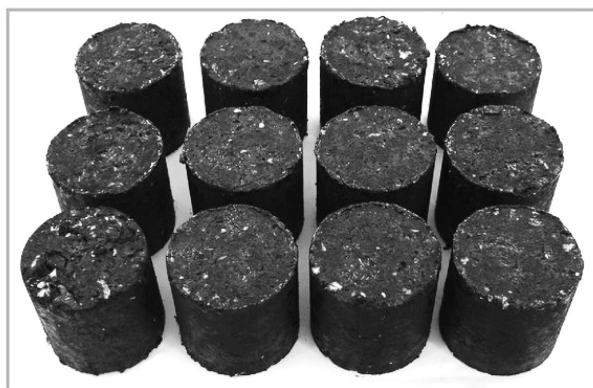


Рис. 5. Образцы регенерированного асфальтобетона, приготовленные для проведения испытаний на предел прочности при сжатии по ГОСТ 2801–98

2) температура асфальтобетонного гранулята перед смешением с разжижителем и модификатором от 30 до 80 °С.

Управление качеством регенерированного асфальтобетона достигается комплексным изучением гранулята, подбором разжижителя и модификатора.

Растущие требования к качеству дорожных одежд требуют проведения углубленного исследования каждого из компонентов битумо-минеральных смесей с применением современных прецизионных методов исследования, включая наноуровень организационной структуры вещества, на всех этапах жизненного цикла асфальтобетона, включая и его возможный ресайклинг.

Отечественный и зарубежный опыт по управлению качеством дорожного строительства, в условиях вступления Российской Федерации в ВТО определяет подходы и методы управления качеством как фактором конкурентоспособности, позволяют формировать и реализовывать стратегию комплексной системы управления качеством в соответствии с требованиями международных стандартов ISO 9000 в инжиниринговой компании для повышения ее конкурентоспособности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурган С. Т., Мустафин С. К. Состав и свойства минерального остова в связи с проблемой управления качеством асфальтобетона / СПб. Дорожная техника, 2010.
2. ГОСТ 22245–90. (Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия).
3. ГОСТ 12801–98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний.
4. ГОСТ 8736–93 (Песок для строительных работ. Технические условия).
5. ГОСТ Р 52129–2003 (Порошок минеральный для асфальтобетонных смесей и органоминеральных смесей. Технические условия).
6. ГОСТ 9128–2009 Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия.
7. Каменева Е. Е. Технологические основы производства щебня из скальных горных пород. М.: Из-

дательство «Горная книга» Издательство МГГУ, 2010. 247 с.

8. Медрес Е. Е. Повышение конкурентоспособности предприятий дорожного строительства в рыночных условиях. Автореф. дисс. канд. эконом наук. СПб.: СПб АСУ, 2007. 23 с.

9. Мелик-Багдасаров М. С., Гиоев К. А., Мелик-Багдасарова Н. А. Строительство и ремонт дорожных асфальтобетонных покрытий. Учебное пособие для студентов вузов. МАДИ (ГТУ). Белгород, 2007. 124 с.

10. Управление качеством дорог: Учебное пособие / Э. Р. Домке, А. П. Бажанов, А. С. Ширшиков. Ростов н/Д: Феникс, 2006. 253 с. Сертификация систем качества организаций дорожного строительства России на принципах международных стандартов ИСО 9000.

11. Singh P., Fogler H. S., Nagarajan N. Journal of Rheology, 1999, Vol. 43, № 6, p. 1437–1459.

ПОЗДРАВЛЕНИЯ

ТАЛИЯ ЗИНУРОВНА ЛЫГИНА



Юбилейный день рождения уже в истории, но в этом выпуске хотелось бы вернуться к этой дате. Талия Зинуровна Лыгина имеет прямое отношение к научной и организационной деятельности Комиссии по технологической минералогии, в состав бюро которой она входит много лет. Закончила химический факультет Казанского государственного университета. Поступила на работу в Институт геологии нерудных полезных ископаемых (ныне ФГУП «ЦНИИГеолнеруд»), в котором работает уже более 30 лет, пройдя путь от инженера до заместителя директора по науке.

По натуре Талия Зинуровна очень деятельный человек, постоянно в поиске нового – в профессии, в жизни. Время тому свидетель: наука – это дело, которым она готова заниматься обстоятельно и серьезно. В лабораториях Аналитическо-Технологического Центра, которым она руководит, находится уникальное оборудование с неограниченным потенциалом возможностей. Центр одним из первых в Республике Татарстан и геологической отрасли прошел аккредитацию и признание технической компетенции в Системах аккредитации аналитических лабораторий и лабораторий радиационного контроля Федерального агентства по техническому регулированию и

метрологии (Росстандарт) России, международной ассоциации аналитических центров ILAC-APLAC, испытательных лабораторий Роснано. В возглавляемом ею Центре поддерживается система менеджмента качества испытательных лабораторий, проводятся уникальные и сложные научные эксперименты.

В 2011 году по инициативе Лыгиной Т. З. согласно требованиям положений Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ была создана Система добровольной сертификации состава и свойств промышленного минерального сырья «Промсырье» и получен сертификат о ее регистрации в едином реестре систем добровольной сертификации.

Она читает лекции в вузах Казани по разноплановым дисциплинам: концепция современного естествознания; науки о Земле; минералогия; кристаллография; минерально-сырьевые ресурсы. Студенты – большая забота Талии Зинуровны, особенно она опекает выпускников. Многие из них в дальнейшем стали сотрудниками института. Этому отношению ее научил Борис Борисович Звягин – профессор, уникальный ученый, один из первых в России, кому присвоена премия Бейли за выдающиеся достижения в области кристаллографии.

В 1990 году она защищает кандидатскую диссертацию, посвященную изучению структурных и кристаллохимических особенностей ленточно-слоистых силикатов, а в 2002 году – докторскую диссертацию по методическим основам комплексной оценки состава и свойств неметаллических полезных ископаемых.

Ее научная деятельность известна широкому кругу специалистов по выступлениям на различных конференциях, симпозиумах. Список работ состоит из более 200 научных публикаций. Т. З. Лыгина является автором пяти монографий и четырех патентов на изобретение.

Научные исследования Т. З. Лыгиной получили всероссийское и международное признание. Она приглашается для проведения совместных исследований и научных выступлений в крупные научные центры России (Сибирское отделение РАН, Карельский и Кольский научные центры РАН и др.) и зарубежья «Thermoscientific» (Швейцария), «Pananalytical» (Голландия), «Bruker», «Netzsch» (Германия), Институт по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан.



Заседание Комиссии по технологической минералогии, Москва-2012



IV семинар по технологической минералогии, Нижний Новгород-2011



Хор Комиссии по технологической минералогии под управлением Т. З Лыгиной, Петрозаводск-2011



VI семинар по технологической минералогии, Москва-2012

Темы исследований Талии Зинуровны получали финансовую поддержку Республиканского фонда НИОКР и Российского фонда фундаментальных исследований.

За успешную и плодотворную научную и трудовую деятельность Т. З. Лыгина награждена значком «Отличник разведки недр», Медалью Ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени, ей присуждены звания «Почетный разведчик недр», Заслуженный деятель науки Республики Татарстан, она является Лауреатом Госпремии Республики Татарстан по науке и технике (2003 г). В 2011 году Талия Зинуровна решением АН Республики Татарстан была награждена званием «Лучший ученый 2011 года».

Тем не менее, при всей ежедневной занятости и необходимости решения самых сложных задач, для Талии Зинуровны Институт нечто большее, чем просто работа. Подводя итоги определенному этапу своей деятельности, она сказала: «Для себя поняла, что окружающие меня люди – самое важ-

ное. Мы живем очень насыщенной жизнью, научной и культурной. Я, может быть, даже по ценности наше уникальное оборудование поставлю на второе место, на первое – людей – прекрасных профессионалов, высококвалифицированных специалистов, неординарных личностей».

С благодарностью комиссия по технологической минералогии вспоминает, как Талия Зинуровна организовала проведение 4-го Российского семинара «Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы», который проходил 14–16 сентября 2009 г. на теплоходе «Борис Полевой» по маршруту Казань – Нижний Новгород – Казань.

Наши пожелания – оставаться такой же, как всегда, осуществлять задуманные планы, передавать знания молодому поколению. Здоровья, личного счастья и новых творческих успехов!

*Комиссия по технологической минералогии
РМО, друзья и коллеги*

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ НИКОЛАЕВ



Анатолию Ивановичу Николаеву исполнилось 3 марта 70 лет. Вся его трудовая жизнь связана с Институтом химии и технологии редких элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС) Кольского научного центра РАН. В 1962 году он был принят на работу в этот институт на должность препаратора. В настоящее время А. И. Николаев член-корреспондент РАН, зам. директора по научной работе, заведующий лабораторией химии и технологии сырья тугоплавких редких элементов, доктор технических наук, профессор, видный российский специалист в области химической технологии, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники (2000).

С 2010 г. он является руководителем Центра наноматериаловедения Кольского научного цен-

тра РАН. Окончил Северо-Западный политехнический институт по специальности технология неорганических веществ (1969).

Основными направлениями его научной деятельности являются фундаментальные и прикладные исследования в области комплексного использования минерально-сырьевых ресурсов и создания Кольского химико-технологического кластера. Им предложены и развиты комбинированные схемы переработки, открывающие путь к освоению нетрадиционных видов титанового и редкометалльного сырья; разработаны базовый пакет комбинированных схем переработки сырья, научные основы организации производства из горнопромышленных отходов высокотехнологичных продуктов, включающих получение чистых, пигментных и сварочных материалов с экологической направленностью, не имеющих аналогов в отечественной и зарубежной практике, сорбенты, пигменты, наполнители, соединения редких металлов; в Мурманской области начато производство новых концентратов как компонентов сварочных материалов. Предложил и изучил новые эффективные экстрагенты для редких металлов с оценкой изменения экстракционных свойств органических фаз при увеличении содержания в них продуктов разрушения экстрагентов. Показал, что некоторые из экстрагентов обладают повышенной устойчивостью и эффективностью по отношению к извлечению ниобия и тантала из сернокислых и фторидных растворов. Установил механизм экстракции фторидных и сульфатных комплексов ниобия, тантала и титана, что привело к разработке эффективных технологических схем переработки лопаритового, перовскитового, пироклорового, сфенового и колумбит-танталитового концентратов.



Участие в работе VIII Российского семинара по технологической минералогии РМО, г. Санкт-Петербург-2013

Николаев А. И. выполняет большой объем научно-организационной и преподавательской работы. Он является членом Президиума Кольского научного центра РАН, заместителем председателя Ученого и диссертационного советов ИХТРЭМС КНЦ РАН, членом бюро Научного совета РАН по химической технологии, Совета учебно-методического объединения университетов России по классическому химическому образованию; Координационного совета Мурманской области по научно-технической и инновационной политике, заместителем председателя секции Научного совета РАН по металлургии, членом редколлегии журналов «Вестник Кольского научного центра РАН», «Химическая технология», «Цветные металлы» и «Титан», профессором Мурманского государственного техническо-

го университета, экспертом РОСНАНО и РФФИ. Он же входит в состав Комиссии по технологической минералогии.

Николаев А. И. награжден медалями «20 лет Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг. » (1966), «Ветеран труда» (1986), Почетной грамотой АН СССР (1974), губернатора Мурманской обл. (2000), занесен в Книгу почета Мурманской обл. (1987). Лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники (2000), заслуженный деятель науки РФ (2007).

Наши поздравления от Комиссии по технологической минералогии и добрые пожелания во всех делах, осуществления новых научных замыслов и здоровья!

Комиссия по технологической минералогии РМО

ПОТЕРИ НАУКИ

ПАМЯТИ ОЛЕГА БОРИСОВИЧА ДУДКИНА (1931–2013)



8 июля 2013 года на 82 году ушел из жизни один из старейших сотрудников Геологического института КНЦ РАН Олег Борисович Дудкин, доктор геолого-минералогических наук, почетный член РМО, член бюро Комиссии по технологической минералогии РМО, увлеченный профессионал и интеллигентный человек. Олег Борисович окончил геологический факультет Уральского государственного университета в 1954 г. Всю свою жизнь он посвятил изучению геологии и минералогии Кольского региона. Его основные научные интересы были связаны с изучением геологии, геохимии, минералогии полезных ископаемых, с технологической минералогией, геоэкологией массивов, пород и руд уникальной Кольской щелочной провинции.

В 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Редкие земли и стронций в апатите Хибинских месторождений», в 1979 г. –

докторскую диссертацию «Апатит и апатитоносность щелочных массивов». С 1982 г. был основателем и бессменным заведующим лабораторией металлогении щелочных массивов, с 2002 г. – главным научным сотрудником. Исследовал минералогию Хибинских апатитовых месторождений, геохимию и процессы формирования месторождений фосфора в щелочных породах и карбонатах. Занимался анализом рудоносности Сыннырского калиевого щелочного массива в Северном Прибайкалье, исследовал карбонаты Хибин, провел сравнительное изучение массивов Сокли (Финляндия), Ковдорского, Вуориярви и Озёрной Вараки (Кольский регион). Провел большую работу по обобщению материалов о щелочных массивах и карбонатах восточной части Фенноскандинавского щита. Особое внимание уделял анализу условий формирования месторождений рудного и нерудного сырья и методологии технологической минералогии на примере щелочных массивов. В последние годы был сосредоточен на общем металлогеническом анализе Кольской щелочной провинции, геохимии эндогенных месторождений фосфора, проблеме безопасного хранения и использования отходов обогащения минерального сырья. Собранные материалы позволили приступить к общему анализу геохимии фосфора в эндогенном процессе. На основе изучения инфильтрационных кор выветривания щелочных массивов О. Б. Дудкин проанализировал экологическую безопасность хранения складированных отходов после обогащения апатитовых руд и оценил их возможное влияние на экосистемы. Опубликовал более 120 научных работ, был профессором АФ МГТУ, в течение многих лет – председателем Кольского отделения РМО. Награжден орденами Дружбы народов (1980) и Почёта (2002), лауреат премии Совета министров СССР (1981) и премии им. А. Е. Ферсмана РАН (1983), почётный член РМО (2004).

Светлая память об Олеге Борисовиче Дудкине навсегда останется в наших сердцах.

*Комиссия по технологической минералогии
и Кольское отделение РМО*

АННОТАЦИИ

УДК 622.7:549.08

Пирогов Б. И. Срастания минералов и структурный анализ руд в технологической минералогии // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 7–27: рис. 10, табл. 3. Библ. назв. 27.

В статье на конкретных примерах рассмотрены основные типы срастаний минералов в железных рудах различного вещественного состава и генезиса. Показана роль онтогенического подхода к расшифровке как природы исходных срастаний, так и их преобразований в системе рудоподготовки при обогащении. Показаны возможности структурного анализа продуктов обогащения с учетом комплекса современных методов исследования руд как на стадии предварительной оценки, так и при минералогическом контроле технологии обогащения в целом.

The main types of mineral intergrowth in compositionally and genetically different iron ores are discussed. Examples of these mineral accretions are given. The role of the ontogenic approach to deciphering the nature of intergrowth formation and its transformations during ore dressing for processing is assessed. The potential of the structural analysis of enrichment products with regard for modern methods of study of ores at the preliminary evaluation stage and during the mineralogical control of the enrichment technology is shown.

УДК 622.7:553.04

Мелентьев Г. Б. Уровни концентрации и закономерности распределения естественных радионуклидов в природных и техногенных источниках редкоземельных металлов и их роль в оценке перспектив использования сырья // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 27–51: табл. 8. Библ. назв. 25.

Дан обзор производства и потребления редкоземельных металлов в мире и состояния в России. Показано значение редкоземельных металлов как инновационного ресурса и важность проблемы возрождения и развития российской редкоземельной продукции на инновационно-технологической основе.

Приводится анализ приоритетных и стабильных источников РЗМ в нашей стране с прошлого века и по настоящее время в связи с естественными радионуклидами в фосфатном сырье и отходах его переработки и известными месторождениями иттриевоземельного сырья для ускоренного промышленного освоения (эвдиалитовое сырье Ловозерского массива, ринколито-ловчорритовое сырье, апатито-лопаритовое сырье, Кейвская щелочногранитная провинция на иттрий,

иттриевые лантаноиды и сопутствующие редкие металлы, российский монацит, минерально-химическое сырье Томторского супергиганта как уникального источника РЗМ, иттрия и редких металлов).

Сделан вывод о необходимости изучения, возможностей и перспективах промышленного использования в России различных сырьевых источников РЗМ. Наиболее эффективным представляется последовательное использование методов техногеохимии, технологической минералогии и техноэкологии

The production and consumption of rare-earth metals in Russia and other countries are reviewed. The significance of rare-earth metals as an innovative resource and the importance of the revival and development of Russian rare-earth products on the innovative-technological basis are discussed. The priority and stable sources of REE in Russia since the 20th century until the present in connection with natural radionuclides in phosphate raw materials and its processing waste and well-known yttrium-earth raw materials for rapid economic development (eudialyte raw material from the Lovozero massif, rinkolite-lovchorite raw material, apatite-loparite raw material, the Keivy alkaline-granitic province, yttrium lanthanoids and associated rare metals, Russian monazite, mineral-chemical raw material of the Tomtor supergiant as a unique source of REM, yttrium and rare metals) are discussed.

The authors have concluded that the potential and prospects of the commercial use of various sources of REE in Russia should be studied. They believe that the consecutive application of technogeochimistry, technological mineralogy and technoeology methods is most efficient.

УДК 550.812.012:[553.068.5:553.493.531'494]

Левченко Е. Н., Калиш Е. А. Новые технологии дезинтеграции редкометалльных руд и россыпей и их влияние на технико-экономические показатели освоения месторождений // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 52–61: рис. 2, табл. 10. Библ. назв. 4.

Проведен анализ новых способов рудоподготовки редкометалльных руд и россыпей на примере целестинсодержащих руд в карбонатных породах Табольского месторождения и титан-циркониевых россыпей Северо-Кавказской россыпной провинции, и их влияние на технологические показатели переработки и технико-экономические показатели освоения месторождений.

New methods for the ore dressing of rare-metal ores and placers are analyzed. Their effect on the technological indices of processing and the technical and economic in-

dices of the development of deposits is estimated. Examples from celestine-bearing ores in carbonate ore from the Tobolsk deposit and the titanium-zirconium placers of the North Caucasian Placer Province are given.

УДК 543.622:550.42

Туресебеков А. Х., Шарипов Х. Т., Олимов Т. Ф. *Технологическая геохимия и минералогия – новая парадигма в изучении организации вещества комплексных эндогенных и техногенных месторождений* // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 62–66: рис. 1, табл. 3. Библ. назв. 10.

В работе обсуждены вопросы организации вещества в комплексных эндогенных и техногенных месторождениях с позиций технологической геохимии и минералогии. Показано, что учет минералогических форм нахождения элементов в природе и в результате трансформации вещества, а также уровень организации вещества позволяет выбрать более эффективные способы обогащения и технологию переработки рудного и техногенного сырья.

Matter structure in complex endogenous and artificial deposits is discussed from the point of view of technological geochemistry and mineralogy. It has been shown that the most efficient enrichment methods and the recycling technology of ores and artificial raw materials can be selected by taking into account the mineralogical forms of occurrence of elements in nature and the forms that result from matter transformation

УДК 622.75

Козлов А. П. *Минералого-технологическая характеристика платиносодержащих дунитовых руд Среднего Урала* // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 66–72: рис. 3. Библ. назв. 5.

Рассмотрены результаты минералого-технологических исследований платиносодержащих дунитов Светлоборского и Нижнетагильского зональных массивов и установлены основные типоморфные признаки продуктивных минеральных парагенезисов. Характерными особенностями рудной платиносодержащей минерализации являются: широкий диапазон состава железо-платиновых сплавов, обогащенность рудоформирующей системы элементами Os, Ir, Rh и активность S и As в ней, включения в платине Fe-Ni сульфидов и сростания ее с магнетитом. Более 80 % зерен минералов МПГ имеет крупность менее 100 мкм, что определяет возможность значительных потерь платины в процессе гравитационного обогащения и необходимость применения технологических процессов доизвлечения мелких и тонких фракций платиноидов из хвостов и шламовых продуктов.

The results of the mineralogical and technological studies of platiniferous dunites from the Svetloborsk and Nizhny Tagil zonal massifs are reported and the basic typomorphic signs of productive mineral assemblages are identified. The characteristic features of platinum ore mineralization are a wide range of the compositions of iron-platinum alloys, the Os, Ir and Rh enrichment of the ore-forming system and S and As activity in it, the intrusion of Fe-Ni sulphides in platinum and its intergrowth with magnetite. As over 80 % of PGM mineral grains are less than 100 microns in size, a lot of platinum can be lost upon gravity separation. Therefore, additional recovery processes for small and fine platinoid fractions from tailings and sludge products are needed.

УДК 549.08:622

Ожогина Е. Г. *Проблемы и перспективы развития количественных минералогических методов оценки качества минерального сырья* // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 72–74.

Минералогические исследования в рамках оценки качества минерального сырья на разных стадиях геологоразведочных работ сегодня обязательно должны быть количественными. Это позволит определять количественный минеральный и гранулярный состав руд, физические и физико-химические свойства минералов и, следовательно, с высокой степенью достоверности оценивать качество полезных ископаемых. Освещены основные проблемы развития количественных методов минералогического анализа, связанные с приборной базой организаций, отсутствием образцов фазового состава и свойств минералов, необходимых для поверки аппаратуры, метрологическим и методическим обеспечением.

Mineralogical studies, carried out to estimate the quality of mineral products at the different stages of geological prospecting, should be conducted quantitatively. This will make it possible to determine the quantitative mineral and granular composition of ores and the physical and physicochemical properties of minerals and, therefore, to reliably evaluate the quality of commercial minerals. The main problems in the development of methods for quantitative mineralogical analysis, related to modern equipment, lack of samples of the phase composition and properties of minerals, required for equipment calibration and metrological and methodical support, are discussed.

УДК 549.67

Котова О. Б. *Научное обоснование и разработка методов энергетических воздействий на труднообогатимое минеральное сырье* // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья.

Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 74–78. Библ. назв. 20.

Статья посвящена развитию методов энергетического модифицирования физико-химических свойств минерального сырья для интенсификации процессов переработки и обогащения.

The updating of methods for the energy modification of the physicochemical properties of mineral products for intensifying processing and enrichment processes is discussed.

УДК 622.7:553.3.

Войтеховский Ю. Л., Карпов С. М. Золото Пирротинового ущелья: технолого-минералогический аспект // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 78–83: рис. 3, табл. 5.

В статье коротко рассмотрены геология, минералогия и результаты технолого-минералогических испытаний колчеданных (с Au, Ag и ЭПГ) руд Пирротинового ущелья, Хибин, Кольский п-ов. Сделан вывод о том, что этот тип руд представляет собой потенциальное сырьё для извлечения благородных металлов.

Geology, mineralogy and the results of the technological-mineralogical tests of pyrrhotite (with Au, Ag and PGE) ores from the Pyrrhotite Gorge in the Khibiny Mountains, Kola Peninsula, are briefly discussed. The authors have concluded that this ore type is a potential source of precious metals.

УДК 622.17:622.343.5

Горбатова Е. А., Зарецкий М. В. Оперативная оценка целесообразности и эффективности технологии переработки текущих хвостов обогащения медно-колчеданных руд // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 83–85: рис. 1. Библ. назв. 3.

Определены минералогические критерии оперативной оценки текущих хвостов обогащения, позволяющие обосновать выбор технологических решений.

The mineralogical criteria for evaluation of mineral processing tailings, which provide the basis for selecting technological solutions, have been developed.

УДК 552.47:666.772(470.22)

Щипцов В. В., Фролов П. В., Ильина В. П., Попова Т. В., Климовская Е. Е. Роль технологической минералогии на современном этапе в создании новых материалов на основе магнетиальных горных пород и промышленных минералов Карелии // Технологическая минералогия в оптимизации процессов

рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 86–93: рис. 3, табл. 4. Библ. назв. 17.

В статье сделан акцент на природные источники магнетиального сырья Карелии и их практическое значение. Результаты исследований позволяют говорить о потенциале высокомагнетиальных пород и промышленных минералов. К нему относятся наиболее ранние комплексы коматиит-базальтовой серии зеленокаменных поясов архея и бонинитоподобные ассоциации в составе супракrustальных толщ тех же поясов, в которых присутствуют новообразованные минералы по высокомагнетиальным породам – тальк, магнезит и серпентин, расслоенные перидотит-габброноритовые массивы – дуниты, оливиниты, серпентиниты, тальковый камень и кемиститы гидроталькит-серпентинитового состава, тальк-карбонатные породы доломитового состава карельского комплекса. Приведены примеры роли технологической минералогии в прогнозной оценке создания новых материалов строительного и технического назначения.

In the present paper the authors concentrate on the natural sources of Mg-rich raw materials in Karelia and their practical application. The results of their studies indicate that Mg-rich rocks and commercial minerals have a great potential. Examples are the earliest complexes of the komatiite-basalt series of Archean greenstone belts and boninite-like assemblages that form part of the supracrustal units of the same belts which comprise newly-formed minerals after Mg-rich rocks such as talc, magnesite and serpentine and layered peridotite-gabbro-norite massifs: dunite, olivinite, serpentinite, soapstone and kemistite of hydrotalcite-serpentine composition and talc-carbonate rocks of dolomite composition of the Karelian complex. Examples, showing the role of technological mineralogy as a prognostication tool in developing new materials for building and technological purposes, are given.

УДК 543.622:551.781

Турсебеков А. Х., Шарипов Х. Т., Василевский Б. Б., Исоков У. М. Технологическая минералогия металлоносных горючих сланцев палеогена Узбекистана // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 93–103: рис. 1, табл. 4. Библ. назв. 4.

Систематизированы данные по геохимии и минералогии на основе детального исследования вещественного состава и минералогических форм нахождения элементов в металлоносных ГС Узбекистана, которые являются основой технологической минералогии ГС. Особое внимание уделено установлению механизма концентрирования промышленно-ценных элементов в исходной минерально-геохимической системе, выявлению минералов-носителей, концентраторам и формам нахождения промышленно-ценных

элементов V, U, Mo, Re, Au, Ag, платиноидов, редких земель и др. в палеогеновых горючих сланцах для решения оптимальных технологий их извлечения.

Geochemical and mineralogical data are classified using the results of the detailed study of the mineral composition and mineralogical forms of occurrence of elements in metalliferous oil shales (OS) of Uzbekistan which provide the basis for the technological mineralogy of OS. Special attention is given to the mechanism of concentration of commercially valuable elements in the original mineral-geochemical system and the forms of occurrence of economically valuable elements, such as V, U, Mo, Re, Au, Ag, platinoids, rare earths, etc. in Paleogene oil shales, that are important for selecting optimum extraction technologies.

УДК 622.73

Аккерман Ю. Э. *Оценка возможности практического использования валков высокого давления в схемах дезинтеграции руды повышенной прочности* // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 103–108: табл. 3. Библ. назв. 1.

Валковые дробилки высокого давления применяются в цементной и горнорудной промышленности для дезинтеграции клинкера, известняка и малоабразивных руд. В статье представлены результаты испытаний дробимости и измельчаемости медно-никелевой руды повышенной прочности в лабораторной валковой дробилке высокого давления, валковой дробилке обычной конструкции, лабораторной шаровой мельнице. Рассмотрены три варианта использования валков высокого давления для увеличения производительности промышленных шаровых мельниц.

High-pressure roller crushers are used in the cement and mining industries for the disintegration of clinker, limestone and poorly abrasive ores. The results of the crushability and grindability tests of highly durable cooper-nickel ore samples in a high-pressure laboratory crusher, a conventionally designed crusher and a laboratory ball mill are reported. Three versions of the use of high-pressure rollers for increasing the productivity of industrial ball mills are discussed.

УДК 622.735.095:622.73

Вайсберг Л. А., Каменева Е. Е. *Изменение структуры порового пространства горных пород в процессе дезинтеграции* // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 108–114: рис. 5, табл. 2. Библ. назв. 16.

Приведены результаты исследования структуры порового пространства горных пород методами ска-

нирующей электронной микроскопии (SEM) и компьютерной рентгеновской микротомографии (x-ray micro-CT). Установлено, что при дезинтеграции происходит изменение структуры порового пространства породы. В дезинтегрированных зернах породы при уменьшении общего количества пор увеличиваются их суммарный объем и удельная поверхность. Общая пористость увеличивается за счет появления новообразованных полостей и микротрещин, а также объединения последними мелких пор в более крупные.

The results of the study of the structure of the pore space of rocks by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray computer microtomography (X-ray micro-CT) are reported. The study has shown that the pore space structure of the rock is changed upon disintegration. As the total number of pores in disintegrated rock grains decreases, their total volume and specific surface area increase. As newly-formed cavities and microfractures appear and as small pores are combined to form larger ones, total porosity increases.

УДК 622.236:622.73.75

Краснов Г. Д., Чихладзе В. В. *Технологическое моделирование дезинтеграции минеральных материалов в роллер-прессе* // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 114–120: рис. 2, табл. 5. Библ. назв. 7.

Проведено сравнение измельчения одних и тех же видов рудного сырья в шаровой и стержневой мельницах, в роллер-прессе и на гидравлическом прессе, в шаровой мельнице и на гидравлическом прессе. При сравнении рассматривались гранулометрический состав продуктов измельчения, распределение рудных элементов по классам крупности, скорость процесса, технологические показатели флотационного обогащения, селективность дезинтеграции и обогатительного разделения.

В целом проведенное исследование подтверждает высокую селективность измельчения методом объемного сжатия и демонстрирует его положительное влияние на результаты последующего процесса обогащения.

Mica is widely used in various industries. The properties of mica depend largely on the dispersivity, fineness and surface condition of its particles. As there interplanar spaces in mica, its particles can be used as carriers of the components used to modify mica and to produce various functional materials.

УДК 667.629.825:032.667:661.882

Николаев А. И., Герасимова Л. Г. *Слоистые природные материалы как носители активных компонентов при получении синтетических и минеральных материалов* // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения

ния минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 120–124: рис. 6, табл. 1, Библ. назв. 9.

Слюды нашли массовое применение в различных отраслях промышленности. Их свойства в значительной степени зависят от дисперсности частиц, степени их тонины, от состояния поверхности. Наличие межплоскостных пространств позволяет использовать частицы слюд в качестве носителей компонентов, применяемых для модифицирования слюд и получения различных функциональных материалов.

Mica is widely used in various industries. The properties of mica depend largely on the dispersivity, fineness and surface condition of its particles. As there interplanar spaces in mica, its particles can be used as carriers of the components used to modify mica and to produce various functional materials.

УДК 549.5:549.1

Скамни́цкая Л. С., Бубнова Т. П. Влияние способа термообработки на физико-механические свойства кварца месторождения Майское // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 124–132: рис. 8, табл. 6. Библ. назв. 5.

Рассмотрено влияние способа термообработки на физико-механические свойства молочно-белого рудного кварца месторождения Майское (Северная Карелия). Показано влияние термообработки на структурные и физико-механические характеристики кварца и состояние поверхности. Предварительными экспериментами по термообработке рудного кварца установлено, что свойства кварца определяются временем термообработки и способом охлаждения, что необходимо учитывать при разработке технологии обогащения.

The effect of a thermal treatment method on the physico-mechanical properties of milky-white ore quartz from the Maiskoe deposit in North Karelia is assessed. The effect of thermal treatment on the structural and physico-mechanical characteristics of quartz and its surface condition is described. Preliminary experiments on the thermal treatment of ore quartz have shown that the properties of quartz depend on the length of thermal treatment and a cooling method. This should be considered when developing enrichment technology.

УДК 549.51:553.62

Светова Е. Н., Скамни́цкая Л. С., Светов С. А. Минералого-геохимическая характеристика палеопротерозойских кварцевых конгломератов как нетрадиционного источника кварцевого сырья // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья.

Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 132–141: рис. 9, табл. 7. Библ. назв. 9.

Рассмотрены минералого-геохимические и технологические особенности кварца из палеопротерозойских конгломератов (Центральная Карелия, п. Гирвас). Показано, что по структурным и геохимическим характеристикам основная часть галечного кварца близка к гидротермальному жильному кварцу и может рассматриваться как перспективное нетрадиционное кварцевое сырье. Предварительными экспериментами по очистке галечного кварца установлено, что качество концентратов определяется количеством и размером включений мусковита и полевого шпата, что необходимо учитывать при отработке технологии обогащения.

The mineralogical, geochemical and technological characteristics of quartz from Paleoproterozoic conglomerates at Girvas, Central Karelia, are discussed. It is shown that main part of the pebble quartz is similar in structural and geochemical characteristics to hydrothermal veined quartz, and can be used as a promising raw material. Preliminary experiments on the purification of pebble quartz have shown that the quality of quartz concentrates depends on the amount and size of muscovite and feldspar inclusions. This should be considered when developing enrichment technology.

УДК 553.9:622.734

Ануфриева С. И., Сладкова Г. А. Анализ изменения состава и свойств тонкодисперсных шунгитовых порошков в зависимости от условий измельчения и классификации шунгитовых пород // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 141–147: рис. 7, табл. 6. Библ. назв. 4.

Определены химический и вещественный составы, гранулометрия шунгитовых порошков, полученных при разных способах и режимах измельчения. Установлены основные требования к физико-химическим показателям шунгитовых порошков, влияющие на их технологические свойства при использовании в качестве наполнителя в резинотехнической промышленности.

The chemical and mineralogical compositions and particle-size distribution of shungite powders, produced by various methods and at various grinding regimes, were determined. Basic requirements for the physico-chemical indices of shungite powders, which affect their technological properties when used as filler in the technical rubber industry, are set up.

УДК 666.365:666.366:553.543

Попова Т. В., Климовская Е. Е., Ильина В. П., Фролов П. В. Минералого-технологические исследова-

дования высокомагнезиальных пород Светлоозерского месторождения как сырья многоцелевого назначения // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 147–155: рис. 6, табл. 3. Библ. назв. 12.

Светлоозерское месторождение медно-никелевых и карбонат-талковых руд, расположенное в Медвежьегорском районе Республики Карелия, относится к комплексным месторождениям. Серпентиниты, вмещающие породы для медно-никелевых руд и залежей талькового сырья, могут представлять интерес как декоративный материал, иметь промышленное значение для производства строительных, облицовочных, керамических материалов. Выполненные минералогические исследования серпентинитов как сырья многоцелевого назначения позволили выделить различия серпентинитов с высоким и низким содержанием железа в серпентине, которые могут быть использованы для получения технической, термостойкой, строительной керамики и в других направлениях. Различия в химическом составе породообразующего серпентина, главным образом, в содержании FeO, наряду с данными о концентрации, размере и характере распределения зерен сопутствующих минералов, необходимо учитывать при выборе направлений использования данного вида сырья.

The Svetloozerskoe copper-nickel and carbonate-talc ore deposit, located in the Medvezhegorsk District of the Republic of Karelia, is a complex deposit. Serpentinities that host copper-nickel ore and talc deposits may be of interest as a decorative material, and can be of commercial value for the production of building, facing, and ceramic materials. The mineralogical and technological studies of serpentinities as a multipurpose raw material were conducted, and some serpentine varieties with high and low iron concentrations in serpentine, which can be used for the production of technical, heat-resistant, construction ceramics and other materials, were identified. Differences in the chemical composition of rock-forming serpentine, mainly in FeO concentration, and data on the concentration, size and distribution of associated mineral grains should be taken into account when selecting the application of these raw materials.

УДК 552.086:553.085:666.762.1

Щербакова Н. Н., Букина Т. Ф., Россихина Г. С., Толубаева Н. В. Атлас структур огнеупорных материалов // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 155–159: рис. 7, табл. 1, Библ. назв. 4.

Информация, полученная в результате минералогических и петрографических исследований вкпе с физико-химическими методами, позволяет определить взаимосвязь конкретной структуры материала с

технологическими факторами производства, идентифицировать и классифицировать кристаллические образования в огнеупорных изделиях и твердые включения в стекле и т. д. Назначение атласа – для разработчиков и технологов производства огнеупорных материалов и изделий, а так же их потребителей.

The interrelation between material structure and the technological factors of production can be determined and crystalline units in refractory products and solid inclusions in glass can be identified and classified, based on the information obtained during mineralogical and petrographic studies. The atlas is designed for developers and technologists dealing with refractory materials and products and their consumers.

УДК 66.022.51.52.66.086.4

Щербакова Н. Н., Синельцев А. А. Обогащение глауконитовых песков месторождений Саратовской области // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 159–163: рис. 3, табл. 5.

По результатам обобщения полученных данных установлено, что для обследованных месторождений глауконитовых песков Саратовского региона характерен мелкофракционный состав; усредненный минералогический состав(%): глауконит 37–50; кварц 46+6; слюда-мусковит 4+1; полевые шпаты 8+2; цеолит; 2+1; хлорит 1+0,5 и др. Разработанные методики исследований и проведенные работы позволили создать опытно – промышленную линию и наладить выпуск конкурентно-способной продукции из природного глауконитового сырья месторождений Саратовской области. Планируется создание опытной инновационной линии для производства комплексных гранулированных глауконитовых сорбентов для очистки питьевой воды и промышленных и бытовых стоков.

The data obtained have shown that the glauconite sand deposits in the Saratov region typically display fine-fracture composition; their averaged mineralogical composition is: 37–50 % glauconite, 46+6 % quartz, 4+1 % mica-muscovite, 8+2 % feldspar, 2+1 % zeolite, 1+0,5 % chlorite, etc. The research methods developed were used to create an experimental production line and to start the manufacturing of competitive products of natural glauconite from the deposits in the Saratov region. Plans to launch an experimental innovative line for the manufacturing of complex granulated glauconite sorbents to purify potable water and industrial and household waste are now under way.

УДК 553.086

Соцкая О. Т., Горячева Е. М. Изучение возможностей прибора QEMSCAN для решения минералого-технологических задач // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудо-

подготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 164–167: рис. 2, табл. 1, Библ. назв. 4.

Методами автоматической минералогии на аппаратно-программном комплексе QEMSCAN изучены минералы из тяжелой фракции проб вкрапленосульфидных руд месторождений Наталка и Павлик, локализованных в терригенных углеродсодержащих породах Аян-Юряхского антиклинория (Северо-Восток России). Получена полезная информация по их минералогической характеристике, включая количественную минералогию, а также данные по минеральным ассоциациям, распределению частиц по крупности и степени раскрытия золота.

Automatic mineralogy methods were employed on a QEMSCAN software complex to study minerals from a heavy fraction of disseminated sulphide ore samples from the Natalka and Pavlik deposits located in the terrigenous carbonaceous rocks of the Ayan-Yuryakhsky anticlinorium, northeastern Russia. Useful information on their mineralogical characteristics, including quantitative mineralogy, and data on mineral assemblages, particle-size distribution and the degree of opening of gold was obtained.

УДК 553.086

Никитенко Е. М., Соцкая О. Т. Использование прибора QEMSCAN для исследования технологических продуктов золотосодержащих руд месторождения «Наталка» // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 167–171: рис. 7, табл. 1. Библ. назв. 3.

В работе приведены результаты исследований технологических промпродуктов, полученных из руды Наталкинского месторождения, которое, локализовано в черносланцевых углеродисто-терригенных отложениях Северо-Востока России (Магаданская область). Месторождение приурочено к Яно-Колымскому складчатому поясу и относится к золото-сульфидному прожилково-вкрапленному типу орогенных месторождений золота. Оруденение характеризуется низкими содержаниями Au (первые граммы на 1 т), присутствием самородного золота разной величины. Золото находится в кварце, арсенопирите, пирите и вмещающих углеродисто-глинистых сланцах. Добыча золота была начата с 1945 г. и произво-

дилась подземным способом, в настоящее время богатые рудные тела отработаны.

The results of the study of the composition of heavy fractions from the auriferous ore of the Natalka deposit (North- East of Russia) are reported. Mineralization is characterized by low concentrations of Au (units ppm), presence of native gold of different sizes. Gold is in quartz, arsenopyrite, pyrite and host carbonaceous shales. Gold mining was started in 1945 using the underground method; now all the rich ore bodies recovered.

УДК 622.7,528.854,004.932

Алехин А. А., Горбунова Е. В., Петухова Д. Б., Чертов А. Н. О проблеме оценки обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 171–176: рис. 3, табл. 1. Библ. назв. 13.

В статье обсуждаются недостатки оптического метода сепарации и возможности его совершенствования. Приведено описание аппаратно-программного комплекса для оценки степени обогатимости минерального сырья оптическим методом.

The shortcomings and possible updating of the optical separation method are discussed. An equipment-software complex, used to estimate the dressability of minerals by the optical method, is described.

УДК 553.5

Буртан С. Т., Мустафин С. К. Управление качеством асфальтобетона на основе оптимизации состава и сочетания минерального и битумного компонентов // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 176–180: рис. 5. Библ. назв. 11.

Clarissa Open Joint-Stock Company is conducting the integrated study of asphalt concrete components such as aggregate which constitutes the mineral framework of mineral powder, bitumen and adhesive additive for the modification of the viscous agent to provide the basis for controlling the quality of asphalt concrete and to predict its condition at all stages in its life cycle. The authors suggest that granulate be studied in integrated manner and a liquefier and a modifier be selected to control the quality of regenerated asphalt concrete.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Пирогов Б. И. Срастания минералов и структурный анализ руд в технологической минералогии	7
Мелентьев Г. Б. Уровни концентрации и закономерности распределения естественных радионуклидов в природных и техногенных источниках редкоземельных металлов и их роль в оценке перспектив использования сырья	27
Левченко Е. Н., Калиш Е. А. Новые технологии дезинтеграции редкометалльных руд и россыпей и их влияние на технико-экономические показатели освоения месторождений	52
Турсебеков А. Х., Шарипов Х. Т., Олимов Т. Ф. Технологическая геохимия и минералогия – новая парадигма в изучении организации вещества комплексных эндогенных и техногенных месторождений ...	62
Козлов А. П. Минералого-технологическая характеристика платиносодержащих дунитовых руд Среднего Урала	66
Ожогина Е. Г. Проблемы и перспективы развития количественных минералогических методов оценки качества минерального сырья	72
Котова О. Б. Научное обоснование и разработка методов энергетических воздействий на труднообогатимое минеральное сырье	74
Войтеховский Ю. Л., Карпов С. М. Золото Пирротинового ущелья: технолого-минералогический аспект	78
Горбатова Е. А., Зарецкий М. В. Оперативная оценка целесообразности и эффективности технологии переработки текущих хвостов обогащения медно-колчеданных руд	83
Щипцов В. В., Фролов П. В., Ильина В. П., Попова Т. В., Климовская Е. Е. Роль технологической минералогии на современном этапе в создании новых материалов на основе магнезиальных горных пород и промышленных минералов Карелии	86
Турсебеков А. Х., Шарипов Х. Т., Василевский Б. Б., Исоков У. М. Технологическая минералогия металлоносных горючих сланцев палеогена Узбекистана	93
Аккерман Ю. Э. Оценка возможности практического использования валков высокого давления в схемах дезинтеграции руды повышенной прочности	103
Вайсберг Л. А., Каменева Е. Е. Изменение структуры порового пространства горных пород в процессе дезинтеграции	108
Краснов Г. Д., Чихладзе В. В. Технологическое моделирование дезинтеграции минеральных материалов в роллер-прессе	114
Николаев А. И., Герасимова Л. Г. Слоистые природные материалы как носители активных компонентов при получении синтетических и минеральных материалов	120
Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Влияние способа термообработки на физико-механические свойства кварца месторождения Майское	124
Светова Е. Н., Скамницкая Л. С., Светов С. А. Минералого-геохимическая характеристика палеопротерозойских кварцевых конгломератов как нетрадиционного источника кварцевого сырья	132
Ануфриева С. И., Сладкова Г. А. Анализ изменения состава и свойств тонкодисперсных шунгитовых порошков в зависимости от условий измельчения и классификации шунгитовых пород	141
Попова Т. В., Климовская Е. Е., Ильина В. П., Фролов П. В. Минералого-технологические исследования высокомагнезиальных пород Светлоозерского месторождения как сырья многоцелевого назначения	147
Щербакова Н. Н., Букина Т. Ф., Россихина Г. С., Толубаева Н. В. Атлас структур огнеупорных материалов	155
Щербакова Н. Н., Синельцев А. А. Обогащение глауконитовых песков месторождений Саратовской области	159

Соцкая О. Т., Горячева Е. М. Изучение возможностей прибора QEMSCAN для решения минералогических задач	164
Никитенко Е. М., Соцкая О. Т. Использование прибора QEMSCAN для исследования технологических продуктов золотосодержащих руд месторождения «Наталка»	167
Алёхин А. А., Горбунова Е. В., Петухова Д. Б., Чертов А. Н. О проблеме оценки обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом	171
Буртан С. Т., Мустафин С. К. Управление качеством асфальтобетона на основе оптимизации состава и сочетания минерального и битумного компонентов	176
ПОЗДРАВЛЕНИЯ	
Талия Зинуровна Лыгина	181
Анатолий Иванович Николаев	183
ПОТЕРИ НАУКИ	
Памяти Олега Борисовича Дудкина	185
АННОТАЦИИ	186

CONTENTS

PREFACE	5
Pirogov B. I. Mineral intergrowth and structural analysis of ores in technological mineralogy	7
Melentyev G. B. Concentration levels and distribution pattern of natural radionuclides in natural and artificial sources of rare-earth metals and their role in assessment of the prospects of the use of raw materials	27
Levchenko E. N., Kalish E. A. Disintegration technologies of rare-metal ores and placers and their effect on the technical and economic indices of the development of deposits	52
Turesebekov A.H., Sharipov H.T., Olimov T.F. Technological geochemistry and mineralogy: a new paradigm in the study of the matter structure of complex endogenous and artificial deposits	62
Kozlov A. P. Mineralogical-technological description of platiniferous dunite ores from the Middle Urals	66
Ozhogina E. G. Problems and prospects in the development of quantitative mineralogical methods for qualitative assessment of mineral raw materials	72
Kotova O. B. Scientific support and development of methods for energy effect on poorly dressable mineral raw materials.	74
Voytekhovsky Yu. L., Karpov S. M. Gold from the Pyrrhotite Gorge: a technological-mineralogical aspect	78
Gorbatova E. A., Zaretsky M. V. Assessment of the potential and efficiency of the processing technology of the tailings of mineral processing of chalcopyrite ores	83
Shchiptsov V. V., Frolov P. V., Ilyina V. P., Popova T. V., Klimovskaya E. E. Role of technological mineralogy at the modern stage in the production of new materials based on Mg-rich rocks and industrial minerals of Karelia	86
Turesebekov A. H., Sharipov H. T., Vasilevsky B. B., Isokov U. M. Technological mineralogy of Paleogene metalliferous oil shales from Uzbekistan.	93
Akkermann Yu. E. Assessment of the possible practical use of high-pressure rolls in the disintegration schemes of highly durable ore	103
Vaisberg L. A., Kameneva E. E. Structural changes in the pore space of rocks upon disintegration	108
Krasnov G. D., Chikhladze V. V. Technological modeling of the disintegration of mineral materials in a roller press	114
Nikolaev A. I., Gerasimova L. G. Layered natural materials as carriers of active components in the production of synthetic and mineral materials	120
Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. The effect of the thermal treatment method on the physical-mechanical properties of quartz from the Maiskoe deposit	124
Svetova E. N., Skamnitskaya L. S., Svetov S. A. Mineralogical-geochemical description of Paleoproterozoic quartz conglomerates as a non-conventional source of quartz as a raw material	132
Anufrieva S. I., Sladkova G. A. Analysis of changes in the composition and properties of finely dispersed shungite powders, depending on grinding conditions and classification of shungite rocks	141
Popova T. V., Klimovskaya E. E., Ilyina V. P., Frolov P. V. Mineralogical-technological study of high-Mg rocks from the Svetloozerskoe deposit as a multi-purpose raw material	147
Shcherbakova N. N., Bukina T. F., Rossikhina G. S., Tolubaeva N. V. Atlas of the structures of refractory materials	155
Shcherbakova N. N., Sineltsev A. A. Dressing of glauconite sand from the deposits in the Saratov region	159
Sotskaya O. T., Goryacheva E. M. Study of the potential of the instrument QEMSCAN for approaching various problems	164
Nikitenko E. M., Sotskaya O. T. The use of a QEMSCAN instrument for studying the technological products of auriferous ores from the Natalka deposit	167

Alekhin A. A., Gorbunova E. V., Petukhova D. B., Chertov A. N. On the assessment of the dressability of ores from solid useful minerals by the optical method	171
Burtan S. T., Mustafin S. K. Controlling the quality of asphalt concrete by optimizing the composition and combination of mineral and bitumen components	176
CONGRATULATIONS	
Taliya Lygina	181
Anatoly Nikolaev	183
LOSSES IN THE SCIENTIFIC COMMUNITY	
In commemoration of Oleg Dudkin	185
ABSTRACTS	186

Научное издание

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ
В ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РУДОПОДГОТОВКИ
И ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Под редакцией д.г.-м.н. В. В. Щитцова

*Печатается по решению Ученого совета
Института геологии КарНЦ РАН*

Сдано в печать 19.03.2014 г. Формат 60x80^{1/8}.
Гарнитура Times. Уч.-изд. л. 21,5. Усл.-печ. л. 23,0
Изд. № 437. Тираж 150. Заказ № 200

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50